

Liebe ehemalige und jetzige LEAner/innen, liebe Förderer des Fachgebiets LEA!

Herzlich willkommen zur 14. Ausgabe unseres LEAiD-Newsletters. Einleitend möchte ich über ausgewählte Neuigkeiten des letzten Jahres bei LEA und dem Institut für Elektrotechnik berichten, ergänzt um wenige Neuigkeiten an der Universität Paderborn. Und wieder schieden im letzten Berichtsjahr einige unserer erfahrenen Mitarbeiter aus wie D. Krishna, J. Solanki, M. Sun, neben dem Stipendiaten J. Tao. Das macht das Stellen neuer Forschungsanträge deutlich, damit junge wissenschaftliche Mitarbeiter unser Team anreichern, neben dem kommutieren vorhandener Mitarbeiter auf neue Projekte.

Seit März hat die UPB eine neue Leitung: Der bisherige Vizepräsident für Forschung und wissenschaftlichen Nachwuchs Prof. W. Schäfers, den einige unserer Ehemaligen über den SFB 614 kennen, ist unser neuer Präsident. Seine Amts-Nachfolgerin ist nun Frau Prof. C. Silberhorn. Sie wird als Leibnizpreisträgerin und Beteiligte des neuen DFG geförderten Sonderforschungsbereichs SFB/TRR 142 „Maßgeschneiderte nichtlineare Photonik“ das Thema der Digitalen Gesellschaft mit den vielen offenen Fragen, Möglichkeiten und Risiken im Fokus der UPB halten, s. neuestes Forschungsforum. Bis auf die Kanzlerin sind die weiteren Präsidiumsmitglieder ebenfalls neu und erstmalig bilden die drei Frauen die Mehrheit.

Zurzeit scheinen Bauarbeiten an der Universität Paderborn erst mal abgeschlossen zu sein, so dass nur die „Lange Zeit nicht mehr Hiergewesenen“ sich auf dem Uni-Campus verirren könnten angesichts der massiven baulichen Änderungen. Sogar die Bautätigkeiten im Kontext der Mensaerweiterung wurden endlich beendet und so finden die Studenten nun 600 lichte Plätze mehr und eine größere Auswahl von Essensangeboten vor. Die UPB-Webseite zeigt neben der aktualisierten Luftaufnahme vom Campus (groups.uni-paderborn.de/fotoarchiv/fotosluftaufnahmen.html) nun auch die erweiterten Sportanlagen.

Neues zu Berufungen und ihre Einbindung in neue Forschungsinitiativen am Institut für Elektrotechnik

Die Berufungskommission unter Leitung von Prof. Böcker zur Besetzung der Professur Regelungs- und Automatisierungstechnik konnte nach langem und zähem Ringen nun endlich ihre Arbeit abschließen, denn zum Beginn des Sommersemester hat unser neuer Kollege Daniel Quevedo seinen Dienst angetreten. Herr Quevedo ist gebürtiger

Chilene, zum Teil in Deutschland aufgewachsen und spricht daher hervorragend Deutsch - und ist nun von der University of Newcastle, Australien, zu uns gewechselt. Wir haben mit ihm einen international hervorragend ausgewiesenen Wissenschaftler gewonnen, mit dem wir bereits einige Fachgespräche geführt haben, denn die Welt der Leistungselektronik ist Herrn Quevedo nicht fremd. Wir hoffen, ein kooperatives Projekt gemeinsam auf dem Weg zu bringen.

Studium und Projekte bei LEA

Die Studierendenzahlen stiegen innerhalb des letzten Jahres im Bachelorstudiengang der Elektrotechnik von 238 auf 258 leicht an, im Masterstudiengang von 86 auf 102 und im englischsprachigen Masterstudiengang „Electrical Systems Engineering (ESE)“ von 113 auf 180. Das hat dazu geführt, dass wir entsprechende Vorlesungen nunmehr in Englisch anbieten. Skripte und Übungen stehen mittlerweile alle auch in Englisch zur Verfügung. Bemerkenswert ist die große Differenz der Studierendenzahl im Wirtschaftsingenieurwesen/Elektrotechnik zwischen den Studiengängen: So waren im Bachelorstudiengang mehr als 200 Studenten eingeschrieben, im Masterstudiengang nur gut 25. Im Gegensatz dazu liegt dieses Verhältnis im Maschinenbau bei etwas weniger als einem Drittel. Die Prüfungsergebnisse der meist ausländischen cand. dieses ESE Studiengangs sind bisher jedenfalls nicht sehr erbaulich und so kann ich noch nicht von einem uneingeschränkten Erfolg sprechen.

Was gibt es Neues von unserem Zusammenschluss der Hochschulen OWL in Bielefeld, Lemgo und Paderborn im Rahmen des Spitzenclusters „Intelligente Technische Systeme it's OWL“, denn dieses größte Projekt ruft weiter eine bemerkenswerte Öffentlichkeit in Wirtschaft und Wissenschaft hervor. Laut Presse war der Gemeinschaftsauftritt der Region OstWestfalenLippe auf der Hannover Messe 2014 ein voller Erfolg. 38 Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Organisationen haben anhand von Demonstratoren neue Lösungen für die „Produktion von morgen“ präsentiert und eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit des Spitzenclusters untermauert. Und man freute sich über eine gegenüber dem Vorjahr nochmals deutlich gestiegene Wahrnehmung, denn neben der Bundesforschungsministerin Johanna Wanka besuchten unter anderem drei NRW-Minister den OWL Gemeinschaftsstand neben weiteren Multiplikatoren, die sich beeindruckt von der Entwicklung des Spitzenclusters zeigten. Kontakte zu Partnernetzwerken konnten vertieft werden.

Fachbesucher zeigten ein hohes Interesse an den konkreten Ansätzen und Bausteinen für Industrie 4.0. In ausgebuchten Fachbesuchertouren der Hannover Messe zum Thema Industrie 4.0 kamen sechs von 27 Ausstellern aus Ostwestfalen-Lippe“. Im Mittelpunkt der Präsentationen auf dem OWL-Gemeinschaftsstand mit 600 qm standen Lösungen aus dem Spitzencluster it's OWL mit den Firmen Beckhoff, Boge, Böllhoff, Claas, DMG Mori Seiki, KEB, Lenze, Miele, Phoenix Contact, Wago und Weidmüller sowie den mittelständischen Unternehmen wie Strothmann oder target Industria.

LEA arbeitet im Clusterquerschnittsprojekt Energieeffizienz in intelligenten technischen Systemen an der Auswahl leistungselektronischer Schaltungen, Schalttechniken, der Erprobung von SiC und GaN Halbleiterbauelementen, Charakterisierung und Modellierung magnetischer Bauteile und dem Energiemanagement und der Betriebsführung für verschiedene Anwendungen. Prof. Böcker leitet dieses Projekt. Für die Innovationsprojekte der Industriepartner AEG-PS Architekturentwicklung eines KMU-Microgrid mit intelligenten Leistungsteilern, Delta-ES Hochkompakte Lader zur intelligenten Netzintegration von E-Fahrzeugen, Hella Reichweitenerweiterung elektrisch angetriebener Fahrzeuge, Miele Energiemanagement im SmartGrid am Beispiel eines Waschtrockners steuert LEA einen großen Teil der Forschungsdienstleistung bei.

Seit Sommer 2014 untersuchen wir mit unserem langjährigen Industriepartner LTi-Drives Hochgeschwindigkeitstrichter, was vom BMBF im Rahmen des Förderprogramms LES 2 unterstützt wird. Am Anwendungsbeispiel einer magnetgelagerten Gasentspannungsturbine werden neue kompakte und kostenoptimale Konzepte und Komponenten für den hocheffizienten Betrieb von Hochgeschwindigkeitsmaschinen erforscht, welche für einen zuverlässigen und wirkungsgradoptimierten Betrieb auf der Motor/Generator- und der Netzeinspeiseseite optimiert sind. Mittels Gasentspannungsturbinen können die bei der Druckreduzierung zwischen den Stufen der öffentlichen Erdgas-Versorgungsnetze frei werdende Strömungsenergie in elektrische Energie umgewandelt werden, wodurch diese einen Beitrag zur ressourcenschonenden Sicherung der Energieversorgung leisten. Beim Entwurf dieser Hochgeschwindigkeitstrichter muss die starke Wechselwirkung zwischen den Systemkomponenten berücksichtigt werden, um die technisch und wirtschaftlich optimale Gesamtlösung zu erhalten. Dazu wird im Projekt als Werkzeug die erst seit wenigen Jahren verfügbare Methode der

Co-Simulation zur übergreifenden und parallelen Bewertung der mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften genutzt. Dieses Simulationstool ermöglicht weiterhin in einer frühen Konzeptfindungsphase den Einfluss von softwarebasierten Regelungs- und Modulationsverfahren zu berücksichtigen. Das aus der Co-Simulation erhaltene Verlustbild kann so im nächsten Schritt für eine gezielte Optimierung der entwickelten Regelungsstruktur sowie den eingesetzten Modulationsverfahren zur Wirkungsgraderhöhung des gesamten Antriebssystems mit einbezogen werden.

Das Projekt mit der Industrie „Entwicklung der Ansteuerung für die frequenzvariable Umformung sehr großer Leistungen (>100MW) mit Thyristorstromrichtern zur Effizienzsteigerung von Turbo-Generator-Sätzen“ wurde formal abgeschlossen. Hierbei soll bei mittelgroßen Kraftwerken die starre Frequenzkopplung zwischen dem elektrischen Netz und dem Generator zwecks Effizienzsteigerung durch einen Umrichter aufgehoben werden. Der Generator kann gegenüber dem elektrischen Netz eine andere Phasenlage, Frequenz und Amplitude aufweisen. Die Leistung wird durch einen Direktumrichter in das elektrische Netz übertragen, der ohne einen Gleichspannungszwischenkreis auskommt. LEA beschäftigt sich hierbei mit einem neuen Steuer- bzw. Regelungsverfahren, dass an einem herunterskalierten Direktumrichter-Prüfstand für 50 kW von Herrn Lönneker erprobt wurde. Letzter hat offene Fragestellungen noch in einem Antrag an die DFG gebündelt, der positiv entschieden wurde und nun von Herrn Leuer nach seiner Promotion zum Thema „Modellprädiktive Regelung permanent erregter Synchronmotoren im Antriebsstrang von Automobilen“ bearbeitet wird. In der Simulation konnte bereits ein erster Ansatz einer direkten Modellprädiktiven Regelung für den Direktumrichter erfolgreich erprobt werden. Das entwickelte Regelungskonzept und die erlangten Erkenntnisse wurden als Publikation zur Veröffentlichung eingereicht.

Im von Herrn Paradkar bearbeiteten Projekt VerfaS werden Verlustmodelle für Motor und Umrichter mittels Kombination von analytischen und numerischen (Finite-Elemente) Verfahren entwickelt. Die Verlustmodelle können dann zur Ermittlung der Effizienz in bestimmten Arbeitspunkten verwendet werden. Neben diesem Verfahren wurde ebenfalls eine analytische Ermittlung der Wirbelstromverluste in den Magneten eines IPM Motor entwickelt. Erste Ergebnisse wurden, bzw. werden auf der IEEE IEMDC 2015 und der ECCE 2015 Konferenz vorgestellt. Zur Zeit wird der elektrische Antrieb mit der „Maximum efficiency“ Betriebsstrategie

getestet.

In den letzten Jahren konnte das Fachgebiet zudem Kompetenzen in der echtzeitfähigen Schätzungen wichtiger Komponententemperaturen in permanenterregten Synchronmotoren festigen. Insbesondere durch die Anwendung neuartiger Identifikationsverfahren für linearparametervariante Systeme konnten hier Schätzgenauigkeiten von unter 5 °C für moderne Traktionsmotoren erzielt werden. Die echtzeitfähige Temperaturschätzung ist notwendig, um thermische Überlastkapazitäten gezielt zu nutzen (z.B. für Überholvorgänge) und die Antriebe somit auf eine geringere Dauerleistung auslegen zu können. Hierdurch wird Material, Gewicht und Bauraum einspart, was als wichtige Verbesserung im Rahmen von Elektromobilitätswendungen zu werten ist. Durch langjährige Industriekooperationen wird das erarbeitete Wissen zurzeit für Vorentwicklungsarbeiten bei Industriepartnern eingesetzt.

Abgeschlossen wurde noch das Transferprojekt des Sonderforschungsbereichs Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus (SFB 614) mit unserem Industriepartner LTI-Drives, was das bisher erarbeitete Instrumentarium der Selbstoptimierung nutzt. Eine selbstoptimierende Antriebsregelung wurde auf Basis eines rekonfigurierbaren FPGAs von Herrn Sun entwickelt. Der angestrebte Nutzen liegt in der einfacheren Adaptierbarkeit eines Standardgeräts an verschiedene Konfigurationen und Betriebsbedingungen. Somit wurden Erkenntnisse der Grundlagenforschung des Sonderforschungsbereichs unter Praxisbedingungen geprüft und in eine prototypische Anwendung umgesetzt.

Im abgeschlossenen DFG-Projekt „Reconfigurable System for Improved Control Performance and Fault Tolerance of Variable Speed AC Drives“ hat Herr Buchholz die Vorteile rekonfigurierbarer Regelungskonzepte für elektrische Antriebe herausgearbeitet. Die Ergebnisse wurden auf den Konferenzen PCIM 2012 und IECON2013 präsentiert. Die Forschungszusammenarbeit auf dem Gebiet hocheffizienter Solarwechselrichter hoher Leistung mit LTI-REEnergy in Unna ist abgeschlossen, was zu einem Vortrag von Herrn Preckwinkel im Rahmen des elektrotechnischen Kolloquiums führte.

Aus dem EU finanzierten Projekt, in dem die Entwicklung von resonanzkonvertergespeisten Hochspannungsprüfgeräten und von hochdynamischen DC-Quellen thematisiert wurden, ging nach den zwei Dissertationen von M. Hu und Z. Cao 2014 noch eine weitere Promotion von J. Tao mit dem Titel Half-Cycle-Sampled Discrete Model of Series-Parallel Resonant Converter with Optimized

Modulation and Its Control Design hervor.

Neben oben genannten wurden noch 2 weitere Projekte zu effizienten Hochleistungsgleichrichtern und hochdynamisch regelbare Stromquelle für Widerstandsschweißsysteme abgeschlossen. Zu erstem Thema wird am 11.6. J. Solanki seinen Promotionsvortrag halten und abends wird voraussichtlich der nächste Dr.-Ing. gefeiert. Er hat zu MMC (modular multilevel converter) basierten Hochleistungsgleichrichtern noch einen Antrag an die DFG verfasst. Das zweite Thema bildet die Grundlage für die Dissertation von D. Krishna, die zur Zeit verfasst wird und für einen Folgeantrag, in dem ein hybrider Speicher und Leistungssteller für Widerstandsschweißsysteme fokussiert werden.

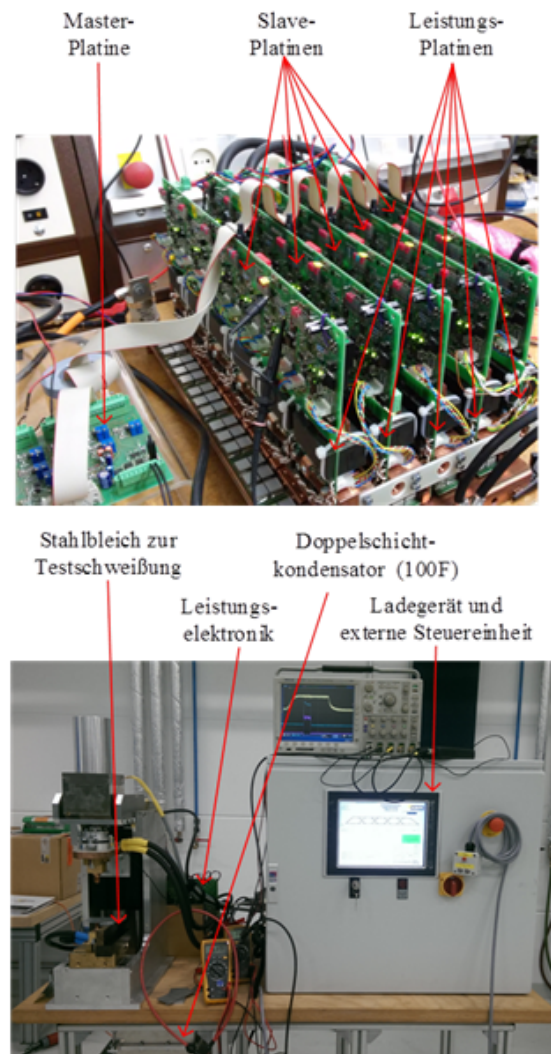


Fig. 1: Demonstrator der Schweißstromquelle

Das von ihm bearbeitete ZIM-Kooperationsprojekt „Entwicklung eines netzrückwirkungsarmen Widerstands-Schweißsystems zum Fügen von Leichtmetallen und hochfesten Stählen mittels

hochdynamisch regelbarer Stromquelle“ wurde Ende 2014 erfolgreich abgeschlossen in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen NIMAK (einem führenden Unternehmen der Fügetechnik). Die neue Schweißstromquelle sollte die Vorteile von zwei bisher genutzten Konzepten kombinieren, indem sie einerseits durch die Zwischenspeicherung der Schweißenergie die bisherige pulsartige Netzbelastung reduziert und andererseits einen hochdynamisch regelbaren Schweißstrom erzeugt. Somit können auch ohne Hochleistungs-Netzanschluss Leichtmetalle und schwierig zu schweißende Legierungen gefügt werden. Im Projekt gelang es mit Hilfe eines Doppelschichtkondensator-Speichers und mehreren versetzt getakteten Tiefsetzstellern die Anforderungen zu erfüllen. Der Prototyp (siehe Fig. 1 auf Seite 3) dient bei NIMAK als Demonstrator für die Vorteile des neuen Konzepts.

Unsere Internetseite können wie gewöhnlich neben den abgeschlossenen Dissertationen die Publikationen des Fachgebiets Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik entnommen werden.

Über die langjährige Kooperation mit unserem Partner Prof. Cronje von der Witwatersrand University (Wits) in Johannesburg, Südafrika, sind zwei Neuigkeiten zu berichten:

Der DAAD hat die finanzielle Förderung eines Studentenaustauschs zwischen der Wits und der UPB bewilligt. Jeweils drei Studenten können erstmals im Sommersemester 2016 die jeweils andere Universität besuchen. Die deutschen Studenten erhalten Reisekosten und monatlich 800 EUR für ihren Aufenthalt.

Die Volkswagenstiftung hat einen gemeinsamen Antrag zu ländlichen Smart-Grids bewilligt. Dieses Projekt wird von Herrn Dr. Solomon Abebe an der Universität in Addis Adebaba, Äthiopien, bearbeitet und gemeinsam von Prof. Cronje und Prof. Böcker betreut. Ein erstes Treffen fand im Februar mit allen Beteiligten in Paderborn statt.

Außerdem hält sich derzeit Herr Marcel Pendieu Kwaye als Doktorand der Universität Pavia, Italien, im Rahmen eines Erasmus-Programms als Gast bei LEA auf. Herr Pendieu Kwaye forscht über die Integration regenerativer Energien für die Situation seines Heimatlandes Kamerun.

Im abgeschlossenen Berichtsjahr können wir voraussichtlich fünf Promotionen (S. Uebener, A. Specht, W. Peters, J. Tao, J. Solanki) feiern, aber vielleicht kommen wir ja noch an die Zahl des Rekordpromotionsjahrs 2014 heran, weil der Lastabwurf weiterer internen und externen Doktoranden ansteht.

Das nächste LEAiD Symposium findet hoffentlich unter reger Teilnahme am 12. Juni 2015 bei Beckhoff in Verl in OWL statt. Neben der Vorstellung des Unternehmens, der Grundlagensoftware: XTS und Anwendung auf ein lineares Transportsystem und der Beteiligung im Rahmen von it's OWL werden wir unser Vereinstreffen durchführen.

Die nächste Wiedersehensmöglichkeit gibt es zuvor aber bei der Promotionsfeier von J. Solanki am 11.6. in unserer IW-Halle. Ich wünsche euch Kreativität, Schaffenskraft, Ausdauer neben einem guten η .

Mit freundlichen Grüßen
Für den Vorstand

Norbert Fröhleke

LEAiD 14. Symposium

Das diesjährige LEAiD-Symposium findet am *12.06.2015 ab 14:00 Uhr* in Verl bei der Firma Beckhoff Automation statt. Neben den sicher interessanten Vorträgen wird auch die jährliche Mitgliederversammlung unseres Vereins durchgeführt. Im Anschluss an den offiziellen Teil wollen wir selbstverständlich wieder die Möglichkeit des geselligen Beisammenseins nutzen.

Tagesordnung

14:00-15:00 Dr. Ursula Frank, Vorstellung der Firma Beckhoff

15:00-16:00 Jan Achterberg, Grundlagensoftware: XTS, The linear transport system

16:00-16:20 Kaffeepause

16:20-17:20 Dr. Josef Papenfort, TwinCAT: eXtended Automation Technology

17:20-17:30 Kaffeepause

17:55-18:30 Mitgliederversammlung

1. Begrüßung und Eröffnung
2. Feststellen der Beschlussfähigkeit
3. Wahl der Versammlungsleitung
4. Wahl der Protokollführung
5. Bericht des Vorstandes
6. Bericht der Kassenprüfer
7. Entlastung des Vorstandes
8. Wahlen
9. Verschiedenes

18:30-19:00 Bekanntgabe und Präsentation des LEAiD Awards

im Anschluss Diskussion mit Abendessen bei Beckhoff

Neue Mitarbeiter



Herr **M. Sc. Marc Hagemeyer** ist seit dem 01. Oktober 2014 im Fachgebiet LEA als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Er beschäftigt sich mit Systemen zur Erzeugung hoher Pulsströme für Schweißanwendungen. Sein zusätzliches Aufgabengebiet umfasst verschiedene Tätigkeiten

für den Prüfungsausschuss Wirtschaftsingenieurwesen. Seinen Bachelorabschluss in Elektrotechnik hat Herr Hagemeyer an der Fachhochschule Bielefeld erworben. Das anschließende Masterstudium hat er dann an der Universität Paderborn absolviert und im Juli 2014 mit einer Masterarbeit über PWM-Wechselstromsteller abgeschlossen.

Highlights 2014/15



Übergabe des LEAiD-Awards 2014 an Arne Rütting



Sommerausflug: Boßeltour durch den Haxtergrund



Auch mit dabei: der Verpflegungswagen



Promotion Andreas Specht



Promotion Wilhelm Peters



Übergabe der Doktorurkunde nach bestandener LEA-Prüfung



Übergabe der Doktorurkunde nach bestandener LEA-Prüfung

Weitere Highlights:
Promotion Stefan Uebener (Daimler)
Promotion Junbing Tao

Simulative Untersuchung des erweiterten Luenberger-Beobachters zur Drehzahlschätzung bei einem Asynchronmotorantrieb

Oleg Buchholz, Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker, Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Universität Paderborn, 33098 Paderborn, Deutschland, buchholz@lea.upb.de, boecker@lea.upb.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird der Einsatz eines erweiterten Luenberger-Beobachters zur Schätzung der Rotordrehfrequenz der Asynchronmaschine beschrieben. Zu diesem Zweck werden die Struktur des Modells, die Freiheitsgrade beim Entwurf und Grenzen dieses modellbasierten Ansatzes erläutert. Im Rahmen einer simulativen Untersuchung erfolgt die Validierung des beschriebenen Ansatzes. Dabei steht der erzielbare absolute Drehzahlfehler im stationären Betrieb im Fokus der Validierung. Dieser wird für den gesamten Drehzahl-Drehmomentbereich quantitativ bestimmt.

I. EINLEITUNG

Die feldorientierte Regelung elektrischer Drehstromantriebe hat sich als Standardregelungsansatz seit der Einführung in den 70er Jahren etabliert. Zur Umsetzung dieses Verfahrens bei einem Asynchronmotorantrieb ist die Kenntnis der aktuellen Rotordrehfrequenz zur Sicherstellung der Feldorientierung, Störgrößenkompensation (EMK-Vorsteuerung) und Spannungsvorsteuerung (Kompensation der verkoppelten, orthogonalen Stromkomponenten durch eine entgegengesetzte Entkopplung im Regler) erforderlich. Mit Hilfe eines Drehgebers kann die Drehfrequenz messtechnisch erfasst werden, dadurch entstehen allerdings höhere System- und Wartungskosten und die Robustheit des Antriebs wird reduziert. Darüber hinaus beansprucht der Drehgeber Einbauraum. Deshalb gibt es zahlreiche Forschungsarbeiten mit dem Ziel, den drehgeberlosen Betrieb der Asynchronmaschine zu ermöglichen. Tatsächlich werden in vielen industriellen Bereichen drehgeberlose Asynchronmotorantriebe eingesetzt, doch wird auch heutzutage noch nicht auf den Drehgeber verzichtet, wenn beste Regelungsperformance angestrebt wird.

Neben Aspekten der Kostensenkung und Erhöhung der Robustheit ist der drehgeberlose Betrieb bei automobilen Traktionsantrieben auch hinsichtlich der funktionalen Sicherheit von großer Bedeutung. Einschlägige Normen, wie bspw. die ISO 26262 zur Sicherstellung der funktionalen Sicherheit bei Straßenfahrzeugen müssen zwingend eingehalten werden. Im laufenden drehgeberbasierten Regelungsbetrieb muss dazu über eine redundante Ermittlung der Drehzahl die korrekte Funktion des Drehgebers in Echtzeit verifiziert und damit ein möglicher Fehlerfall sicher detektiert werden, um das System in einen definierten sicheren Zustand zu überführen oder geberlos einen Notbetriebsmodus zu ermöglichen.

Zur Erfüllung dieser Zielvorgaben im gesamten Drehzahl-Drehmoment-Bereich (sowohl im motorischen, als auch generatorischen Betrieb) der Asynchronmaschine wurden im Laufe der Jahre viele Ansätze entwickelt. Bisher gibt es allerdings keinen als serientauglich anerkannten Lösungsansatz, der eine sichere Schätzung der Drehzahl in allen 4 Quadranten des Betriebsbereichs gewährleistet. Eine erste grobe Unterteilung der Verfahren zur Drehzahlschätzung kann in Abhängigkeit des betrachteten Drehzahlbereichs erfolgen. Im oberen und mittleren Drehzahlbereich sowie bis zu einer unteren Grenzdrehzahl (die in Abhängigkeit des verwendeten Verfahrens variiert),

können modellbasierte Verfahren, welche auf der Grundwellenmodellierung der Asynchronmaschine aufsetzen zur Drehzahlschätzung eingesetzt werden. Der Bereich um die Null-drehzahl herum muss allerdings gesondert betrachtet werden, da modellbasierte Verfahren aufgrund der verschwindenden induzierten Spannung bei niedrigen Drehzahlen nicht verwendet werden können. Im unteren Drehzahlbereich kommen alternative Verfahren zum Einsatz, die vorhandene oder künstlich eingeführte Anisotropien der betrachteten Maschine ausnutzen. Ein möglicher Einsatz dieser Verfahren muss allerdings im Einzelfall für die betrachtete Maschine geprüft werden. Alternativ ist auch die Auswertung des Sternpunktpotenzials denkbar sowie eine Installation von Messspulen um einzelne Statorzähne, mit denen über die Bestimmung der Harmonischen des Luftspaltfeldes auf die Drehfrequenz des Rotors geschlossen werden kann.

In diesem Beitrag wird aus dem breiten Spektrum möglicher Verfahren der erweiterte Luenberger-Beobachter (ELB) als modellbasierter Ansatz auf seine Tauglichkeit zur Schätzung der aktuellen Rotordrehfrequenz untersucht. Dazu wird der Entwurf des Beobachters erläutert und Ergebnisse simulativer Untersuchungen dargestellt.

II. ERWEITERTER LUENBERGER-BEOBACHTER

Zur Schätzung der Drehfrequenz mit dem erweiterten Luenberger-Beobachter wird auf die analytische Beschreibung der Asynchronmaschine mit Hilfe des Grundwellenmodells [1] zurückgegriffen. Die Grundschwingungsgrößen der Statorspannungen und -ströme gehen dabei als Eingangsgrößen ein. Während die Statorströme als Messgrößen zur Verfügung stehen werden die Statorspannungen nicht gemessen, sondern indirekt über den Messwert der Zwischenkreisspannung und die Sollspannungen des Stromreglers rekonstruiert. Deshalb sollte die Wechselrichtercharakteristik berücksichtigt werden, um die entstehende Differenz zwischen der Sollspannung am Ausgang des Stromreglers und der an den Motorklemmen über den Wechselrichter angelegten Spannung auszugleichen. Eine prinzipbedingte Einschränkung stellt zudem die induzierte Spannung dar. Bei niedrigen Drehzahlen sind die Amplituden der induzierten Spannung und damit der Ausgangsspannung des Wechselrichters entsprechend niedrig, sodass sich Parameterabweichungen und Messungenauigkeiten besonders stark auf die Schätzgenauigkeit auswirken. Mit kleiner werdender Dreh-

zahl ergibt sich insbesondere eine kritische Abhängigkeit vom temperaturabhängigen Statorwiderstand der Maschine.

Auf die mathematischen Grundlagen zur Beschreibung der Asynchronmaschine soll hier nicht näher eingegangen werden, dazu sei auf Grundlagenliteratur [1] verwiesen. Das Zustandsraummodell der Asynchronmaschine in statorfesten Koordinaten wird als Grundlage für den erweiterten Luenberger-Beobachter genutzt. Da die Drehfrequenz des Rotors ω_{rs} mit geschätzt werden soll, wird diese innerhalb eines erweiterten Zustandsvektors \hat{x}_e berücksichtigt. Das nichtlineare Zustandsraummodell des Beobachters ergibt sich damit zu:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\psi}}_s(t) \\ \dot{\hat{\psi}}_r(t) \\ \dot{\hat{\omega}}_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & -\frac{R_r}{\sigma L_r} + j\hat{\omega}_{rs} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\psi}_s(t) \\ \hat{\psi}_r(t) \\ \hat{\omega}_{rs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_s(t) + K_e(\hat{\omega}_{rs}) e_i(t) \quad (1)$$

$$\hat{x}_e(t) = \hat{A}_e(\hat{\omega}_{rs}) \hat{x}_e(t) + \hat{B}_e u_s(t) + K_e(\hat{\omega}_{rs}) e_i(t)$$

$$\hat{z}_s(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\psi}_s(t) \\ \hat{\psi}_r(t) \\ \hat{\omega}_{rs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\hat{z}_s(t) = \hat{C}_e \hat{x}_e(t)$$

Im geberlosen Betrieb wird der Ausgangsgrößenfehler $e_i = \hat{z}_s - \hat{z}_s$ somit zusätzlich zur Adaption der geschätzten Drehfrequenz $\hat{\omega}_{rs}$ ausgewertet. Dieser Zusammenhang ergibt sich aus dem Stabilitätskriterium nach Lyapunov. Insbesondere kann dies bei der Auslegung der Rückführmatrix K_e ausgenutzt werden. Das Strukturbild des Systems wird in Abb. 1 gezeigt.

A. Auslegung der Rückführmatrix K_e

Der einzige Freiheitsgrad bei der Auslegung des Luenberger-Beobachters liegt in der Wahl der Koeffizienten $k_i \in \mathbb{C}$ der Rückführmatrix K_e , wodurch das Konvergenzverhalten des Beobachters festgelegt wird. Diese lässt sich in zwei Teilmatrizen $K_e = [K \ K_2]^T$ unterteilen. Die Teilmatrix $K = [k_1 \ k_2]^T$ kann mit bekannten Verfahren zur Auslegung der Rückführverstärkung für den Luenberger-Beobachter entworfen werden und die Teilmatrix K_2 ergibt sich durch das Stabilitätskriterium nach Lyapunov.

Die Teilmatrix K lässt sich entweder nach dem Verfahren der Eigenwertvorgabe oder des optimalen Filterentwurfs nach Riccati [4] auslegen. In beiden Fällen werden die Eigenwerte λ_{ELB} der Dynamikmatrix $\hat{F} = \hat{A} - K \hat{C}$ links von den System-eigenwerten λ in der linken s -Halbebene platziert, wodurch der Beobachter im Vergleich zum System schneller konvergieren kann. Der Unterschied beider Verfahren besteht darin, dass die Auslegung nach der Methode der Eigenwertvorgabe bei gelegentlich auftretenden Störungen angewendet werden kann, während die Auslegung nach dem optimalen Filterentwurf bei

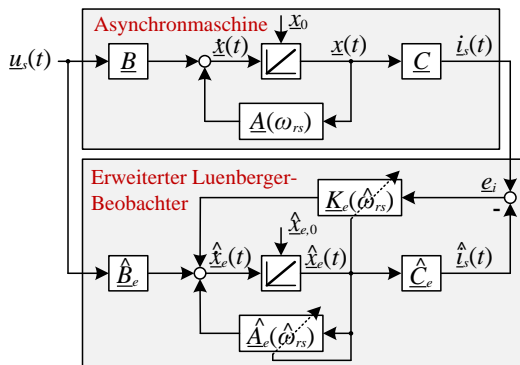


Abb. 1: Strukturbild des Gesamtsystems

dauerhaften stochastischen Störungen vorteilhafter ist. Die Lage der Eigenwerte der System- und Dynamikmatrix werden vergleichend in Abb. 2 dargestellt.

Bei der Auslegung der Teilmatrix K_2 werden die Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchung mit dem Stabilitätskriterium nach Lyapunov berücksichtigt. Aus diesen folgt, dass die Drehfrequenz des Rotors durch Auswertung des Stromfehlers $e_{i,q} = \hat{i}_q - i_q$ in q -Richtung des rotorflussorientierten dq-Koordinatensystems adaptiert werden kann. Bei Berücksichtigung eines zusätzlichen konstanten Verstärkungsfaktors K_2 folgt für die gesuchte Teilmatrix $K_2 = K_2 e^{-j\varepsilon_{\psi_r}}$, mit ε_{ψ_r} als Winkel des Rotorflussvektors.

B. Beobachtbarkeit

Die Schätzung nichtmessbarer Zustandsgrößen \hat{x}_e aus den Klemmengrößen der Asynchronmaschine kann nur dann durch den erweiterten Luenberger-Beobachter erfolgen, wenn das erweiterte 5-dimensionale Modell in Zustandsraumdarstellung vollständig beobachtbar ist. Dazu muss das mathematische Modell des Systems hinsichtlich der Eigenschaft der Beobachtbarkeit überprüft werden. Die Untersuchung erfolgt der Einfachheit halber mit dem zeitkontinuierlichen Modell, da die Zeitdiskretisierung des Systems bei hinreichend kleiner Abtastzeit zu äquivalenten Ergebnissen hinsichtlich dieser Systemeigenschaft führen sollte. Kriterien zur Beurteilung der Beobachtbarkeit sind nur für lineare und bestimmte Klassen nichtlinearer Systeme bekannt. Allerdings kann für nichtlineare Systeme eine Untersuchung der lokalen Beobachtbarkeit um einen linearisierten Arbeitspunkt durchgeführt werden. Dabei sind linearisierte Arbeitspunkte im stationären Zustand von Interesse, die durch konstant rotierende Zeiger der Spannungen, Flüsse und Ströme mit der Statorfrequenz ω_s gekennzeichnet sind.

Die Untersuchung der Beobachtbarkeit erfolgt aus diesem Grund in einem Referenzkoordinatensystem das synchron mit diesen Vektoren, d.h. mit der Statorfrequenz ω_s rotiert und um einen Arbeitspunkt $x_0 = [\psi_{s,0} \ \psi_{r,0} \ \omega_{rs,0}]^T$ linearisiert ist.

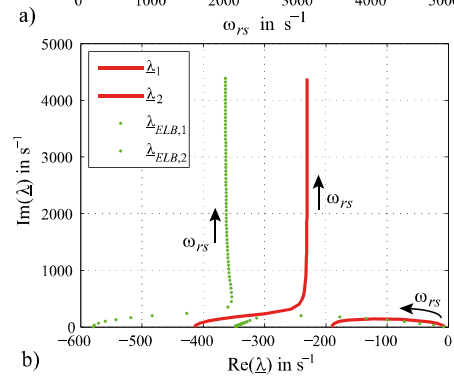
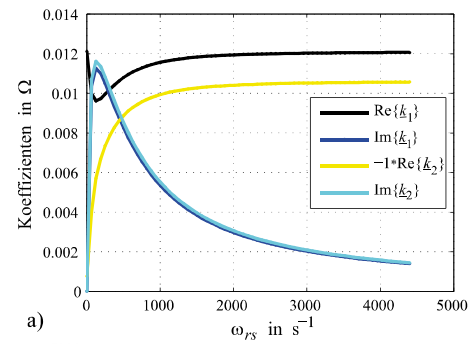


Abb. 2: Auslegung der Rückführmatrix
a) Koeffizienten der Rückführmatrix
b) Lage der Eigenwerte des Systems und des ELBs

Dadurch liegen alle Signale im stationären Betrieb, äquivalent zur Transformation in das rotorflussorientierte Koordinatensystem beim feldorientierten Regelungsansatz, als Gleichgrößen vor und können einfacher interpretiert werden. Für das linearisierte Modell können anschließend Kriterien zur Feststellung der Beobachtbarkeit nach Kalman (Anzahl der beobachtbaren Zustandsgrößen) und Hautus (Überprüfung der einzelnen Eigenwerte), bekannt aus der linearen Theorie der Regelungstechnik [4], ausgewertet werden. In Abb. 3 werden Ergebnisse der Beobachtbarkeitsuntersuchungen für verschiedene Stator Drehfeld- und Schlupffrequenzen f_r dargestellt. Die Auswertung der Beobachtbarkeitskriterien für niedrige Stator Drehfeldfrequenzen für den nicht trivialen Fall $|\psi_{r,\alpha 0}| \neq 0$ Vs, $|\psi_{r,\beta 0}| \neq 0$ Vs zeigt, dass die Beobachtbarkeit aufgrund einer niedrigen Stator Drehfeldfrequenz verloren geht (dargestellt durch die Anzahl nichtbeobachtbarer Zustände $\#x_{unobsv}$) und nicht etwa aufgrund einer niedrigen Drehfrequenz des Rotors. Eine genauere untere Grenze kann jedoch nicht ausgemacht werden, da beide Kriterien unterschiedliche Ergebnisse dazu liefern. Nach dem Kalman-Kriterium variiert die untere Stator Drehfeldfrequenz lastabhängig im Bereich $|f_s| \approx 0..2$ Hz. Die Auswertung nach dem Hautus-Kriterium hingegen zeigt, dass alleine der Fall $f_s = 0$ Hz zum Verlust der Beobachtbarkeit führt.

C. Diskretisierung

Zur Realisierung des Beobachters auf einer digitalen Regelungsplattform muss das zeitkontinuierliche Zustandsraummodell zunächst diskretisiert werden. Dies ist mit dem Euler-Vorwärts-Verfahren nach [3] zulässig, wenn die zugrundegelegten Stator- und Rotorspannungsgleichungen zunächst in unterschiedlichen Koordinatensystemen diskretisiert und anschließend in ein gemeinsames (das statorfeste $\alpha\beta$ -Koordinatensystem) transformiert werden. Das resultierende zeitdiskrete Modell des Beobachters mit der Abtastzeit T_s resultiert zu:

$$\hat{x}_e(k+1) = \Phi_e(T_s)\hat{x}_e(k) + H_e(T_s)\underline{u}_s(k) + K_{e,d}(T_s)\underline{e}_i(k) \quad (3)$$

$$\hat{i}_s(k) = \underline{C}_e(k)\hat{x}_e(k) \quad (4)$$

mit der Transitionsmatrix:

$$\Phi_e(T_s) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s R_s}{\sigma L_s} & \frac{T_s R_s L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ \frac{T_s R_r L_m}{\sigma L_s L_r} e^{jT_s \hat{\omega}_{rs}} & \left(1 - \frac{T_s R_r}{\sigma L_r}\right) e^{jT_s \hat{\omega}_{rs}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

den diskreten Ein- und Ausgangsmatrizen $H_e(T_s)$ und $\underline{C}_e(k)$:

$$\underline{H}_e(T_s) = \begin{bmatrix} T_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \underline{C}_e(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \end{bmatrix}$$

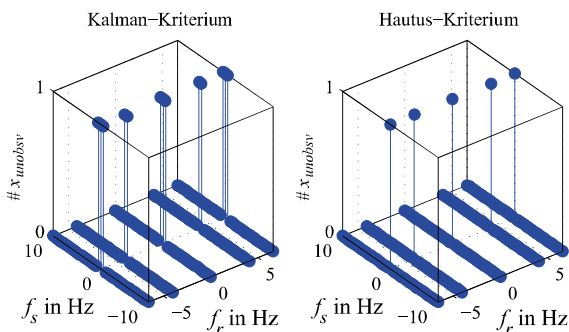


Abb. 3: Ergebnisse der Beobachtbarkeitsuntersuchung

und der diskreten Rückführverstärkung $\underline{K}_{e,d}(T_s) = T_s \underline{K}_e(\hat{\omega}_{rs})$.

III. SIMULATIVE UNTERSUCHUNG

Der erweiterte Luenberger-Beobachter wird zur simulativen Erprobung des Ansatzes parallel zu einem feldorientierten Regelungsmodell eines Asynchronmotorantriebs für Traktionsanwendungen (Drehzahl n_{MM}) geschaltet. Somit dient dieser nur zur parallelen Schätzung der Drehzahl n_{ELB} und nicht zur Realisierung des geberlosen Betriebs. Zur Bewertung des Ansatzes wird in einem ersten Schritt der absolute Drehzahlfehler $\Delta n = n_{MM} - n_{ELB}$ im stationären Betrieb für den gesamten Drehzahl-Drehmomentbereich simuliert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in Abb. 4 a) dargestellt. In Abb. 4 b) wurde der Bereich niedriger Drehzahlen simuliert,

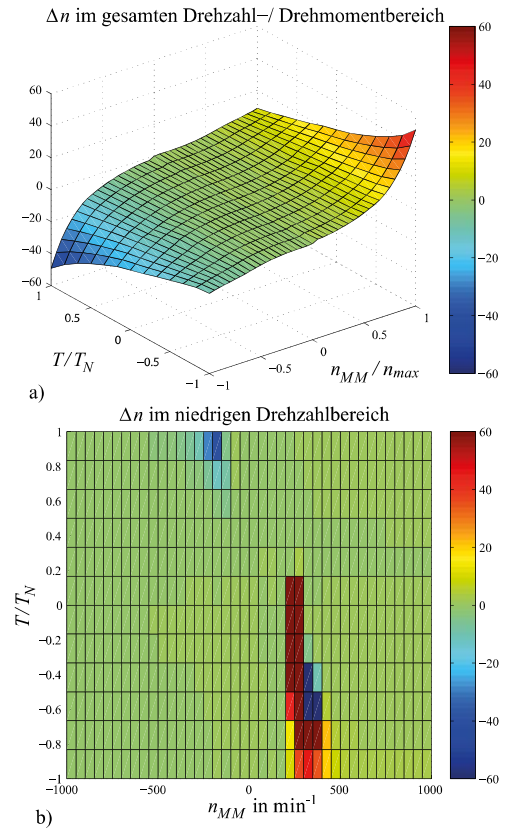


Abb. 4: Stationär erzielbarer absoluter Drehzahlfehler

a) im gesamten Drehzahl-Drehmomentbereich

b) Verlust der Beobachtbarkeit bei niedrigen Drehzahlen

hier ist im Bereich $f_s \approx 0$ Hz der Verlust der Beobachtbarkeit des ELBs deutlich erkennbar.

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Die Schätzung der Drehzahl mit dem vorgestellten Ansatz ist möglich, jedoch auf einen Bereich oberhalb der Nullstator Drehfeldfrequenz beschränkt. Eine genauere untere Grenze lässt sich nicht angeben und muss in der Praxis am Prüfstand erprobt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] W. Leonhard, "Control of Electrical Drives," 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, Deutschland, 2001.
- [2] H. Kubota, K. Matsuse, and T. Nakano, "DSP-Based Speed Adaptive Flux observer of Induction Motor," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, März/April 1993.
- [3] J. Böcker, "Discrete-Time Flux Observer for PWM Inverter Fed Induction Motors," ETEP, Vol. 1, No. 2, März/April 1991.

Herausforderung Elektromobilität

Erhöhung der Reichweite elektrisch angetriebener Fahrzeuge

Von Joachim Böcker,
Lukas Keuck,
Wilhelm Peters und
Oliver Wallscheid



Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker leitet seit 2003 das Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik (LEA). Forschungsschwerpunkte liegen in der Modellierung und Regelung von elektrischen Antriebssystemen, effizienten leistungselektronischen Konvertern und dem Energiemanagement, insbesondere im Kontext der Elektromobilität und der Energiewende.

Die Elektromobilität steht für einen Paradigmenwechsel in der Antriebstechnologie des Automobils. Der Einsatz elektrischer Antriebe soll die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen auf Kohlenwasserstoffbasis sowie die Emissionen von Schadstoffen und CO₂ verringern. Derzeit stellt die Speicherung elektrischer Energie eine zentrale Herausforderung der Elektromobilität dar. Die Reichweite elektrisch angetriebener Fahrzeuge ist durch die Energiedichte (Energie pro Gewicht und pro Volumen) aktueller Speichertechnologien limitiert. Eine Verbesserung der Energiedichte wirkt sich daher unmittelbar auf die Reichweite aus. Jedoch ist auch die Weiterentwicklung elektrischer Antriebssysteme und weiterer Nebenaggregate, die nicht direkt der Fortbewegung dienen, eine ebenso wichtige Aufgabe. Ausgehend von einem gegebenen Energiespeicher gilt es, die verfügbare Energie so effizient wie möglich zu nutzen und damit eine möglichst hohe Reichweite zu erzielen.

Fossile Kraftstoffe sind exzellente Energiespeicher. Die volumetrische Energiedichte von Benzin beträgt 8,9 kWh/L, Diesel weist 9,8 kWh/L auf; die gravimetrische Energiedichte von Benzin und Diesel beträgt 11,8 kWh/kg. Beim Auftanken von konventionellen Fahrzeugen mit einem Tankvolumen von 60 L innerhalb einer Dauer von 60 s fließt durch den Tankschlauch ein chemischer Energiestrom mit einer Leistung von 32 MW bei Benzin und 35,5 MW bei Diesel. Das entspricht der Leistung von zehn Windkraftanlagen oder einer Photo-

voltaikanlage mit einer Fläche von 50 Fußballplätzen bei Volllast. Die Vorteile konventioneller Verbrennungsmotoren liegen, trotz ihrer erheblichen Verluste von etwa 60 Prozent und mehr aufgrund des thermodynamischen Kreisprozesses, in der hohen Energiedichte fossiler Kraftstoffe und der Möglichkeit einer schnellen Befüllung des Energiespeichers. Lithium-Ionen-Batterien weisen eine erheblich geringere Energiedichte von bis zu 0,15 kWh/kg sowie 0,35 kWh/L auf. Der Ladevorgang einer Batterie dauert zudem deutlich länger als die Betankung eines konventionellen Fahrzeugs, da hier lediglich Ladeleistungen im ein- bis zweistelligen kW-Bereich realisiert werden können. Wegen der geringen Energiedichte heutiger Batterien sind aktuelle elektrisch angetriebene Fahrzeuge wie z. B. BMW i3 oder VW e-up! für Reichweiten zwischen 100 bis 200 km ausgelegt. Eine Alternative zu Batterien stellen Brennstoffzellen mit Wasserstoffspeichern dar, welche ähnlich schnell wie ein konventioneller Tank befüllt werden können. Der im Wasserstofftank mitführbare Energievorrat ist zwar größer als bei Batterien, allerdings gibt es noch keine durchgängige Wasserstofftankstelleninfrastruktur, was der Verbreitung dieser Technologie im Fahrzeug entgegensteht. Diese Technologie soll daher im Folgenden nicht näher betrachtet werden. Neben der Realisierung eines elektrischen Energiespeichers als Batterie können zudem mehrere Speicherarten zu einem sogenannten hybriden Energiespeicher zusammengefasst werden. Die Untersuchung solcher Ansätze wurde u. a. in den



© Petalir - Fotolia.com

letzten Jahren durch das Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik (LEA) vorangetrieben. Hierbei werden die Vorteile verschiedener Speichertechnologien, z. B. auf hohe Energiedichten optimierte Lithium-Ionen-Batterien (Reichweite) mit leistungsstarken Doppelschichtkondensatoren (Spitzenleistung für Beschleunigungsvorgänge) kombiniert. Hieraus resultieren gegenüber dem reinen Batteriespeicher Vorteile hinsichtlich Gewicht, Volumen und Effizienz des Gesamtspeichers, welche allerdings durch zusätzliche Systemkomplexität erkauft werden.

Reichweiten von vielen Hundert Kilometern, wie wir sie von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen gewohnt sind, lassen sich sowohl mit Batterien als auch mit hybriden Speichern nur zu unverhältnismäßig hohen Kosten realisieren und würden zudem zu einem viel zu großen Fahrzeuggewicht führen. Statistiken zum Nutzungsverhalten privater Fahrzeughalter zeigen jedoch, dass fast 90 Prozent aller Fahrzeuge pro Tag weniger als 100 km zurücklegen, 50 Prozent sogar weniger als 50 km. Somit ist es möglich, einen Großteil der Fahrten mit einem Elektrofahrzeug zurückzulegen und bei Bedarf auf andere Mobilitätsträger zurückzugreifen. Insbesondere im Hinblick auf eine zunehmende Urbanisierung bieten Elektrofahrzeuge das Potenzial, die Schadstoffbelastung in Großstädten durch lokal emissionsfreies Fahren zu verringern. Durch die Elektrifizierung von Fahrzeugen können zudem unterschiedliche Energiequellen flexibel bei der Bereitstellung der elektrischen Energie

verwendet werden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass ein flächendeckendes Energieverteilungsnetz bereits zur Verfügung steht und die Integration von rund 1 Millionen Elektrofahrzeugen ohne nennenswerten Netzausbau ermöglicht. Bei dem knappen Energieinhalt einer Batterie gilt es, die verfügbare Energie möglichst effizient zu nutzen, um eine große Reichweite zu erzielen. Dabei ist nicht nur die Effizienz des elektrischen Antriebs maßgebend. Auch Nebenaggregate, die nicht direkt der Fortbewegung dienen, können einen erheblichen Anteil des Energiebedarfs ausmachen. Neben dem direkten Energiebedarf wirken sich zudem sämtliche Komponenten auch indirekt über ihr Gewicht auf die Reichweite eines Fahrzeugs aus.

Fahrzeugstrukturen und Bordnetze

Für das Bordnetz konventioneller Kraftfahrzeuge hat sich eine Betriebsspannung von 12/14 V etabliert. Da die elektrischen Verbraucher keine allzu großen Leistungen erfordern, ergeben sich daraus akzeptable Stromstärken und Leitungsquerschnitte. Diese Spannung würde einem elektrischen Fahrentrieb mit einer Leistung im zweistelligen kW-Bereich jedoch zu Strömen von einigen 1 000 A führen, wofür nicht akzeptable Leitungsquerschnitte vorgesehen werden müssten. Daher werden für den elektrischen Antrieb Betriebsspannungen von 200 bis 450 V vorgesehen. Ein Standard hat sich allerdings noch nicht etabliert (Abbildung 1 und Abbildung 2).

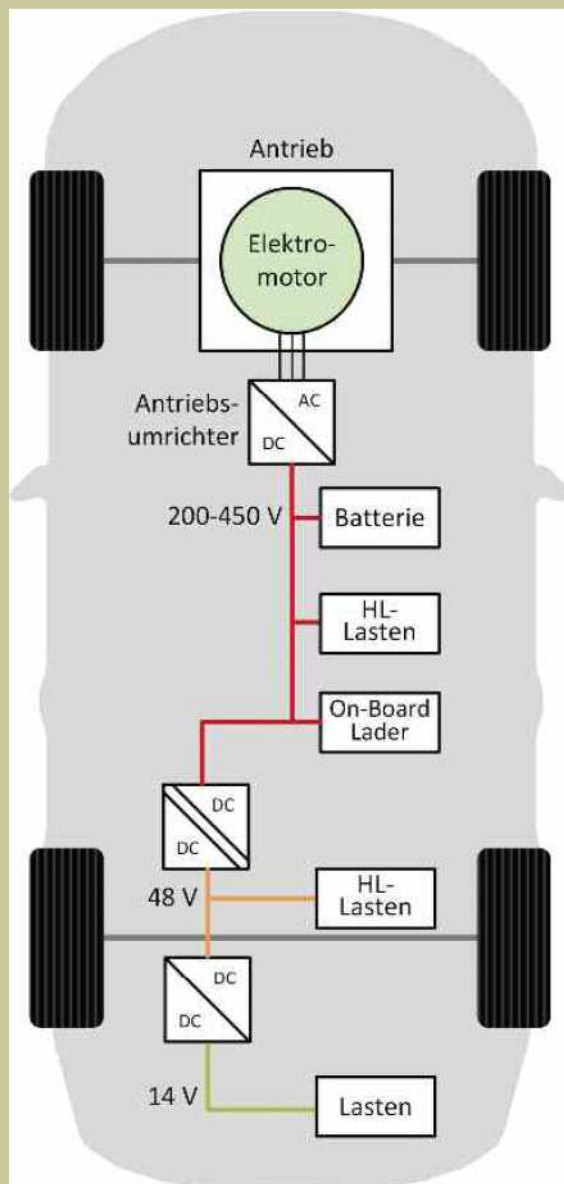


Abb. 1: Mehrspannungsbordnetz in einem E-Fahrzeug.

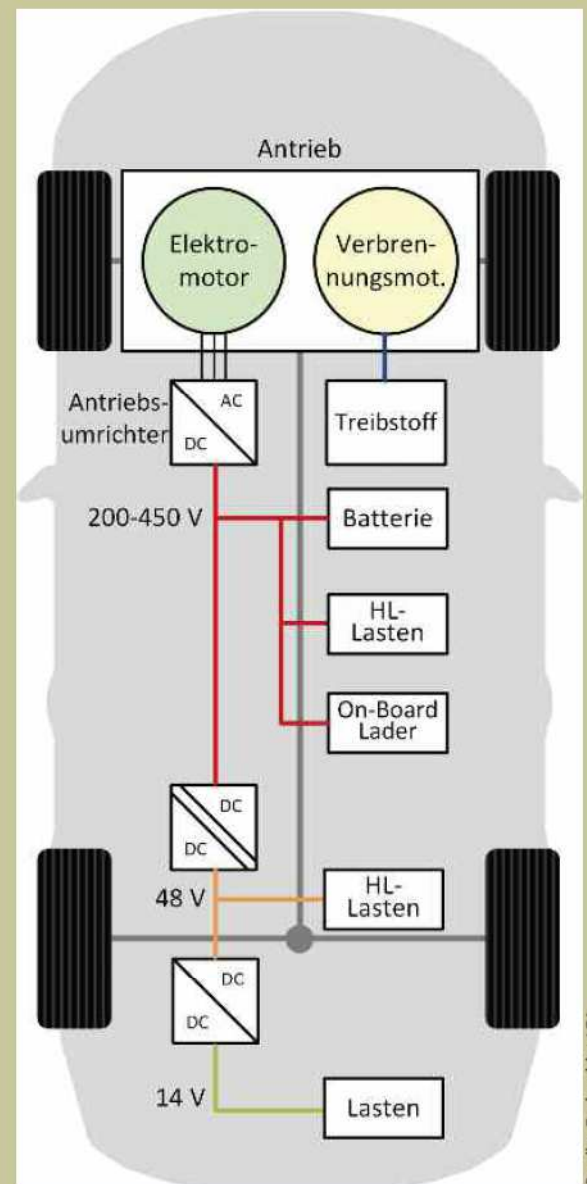


Abb. 2: Mehrspannungsbordnetz in einem Hybridfahrzeug.

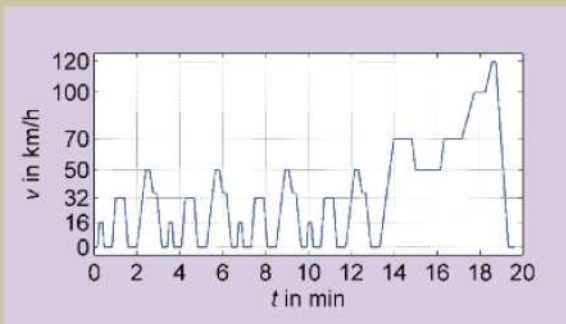
Quelle: Fachgebiet LEA

Da jedoch eine solche Spannung größeren Aufwand für Isolation erfordert, wäre es ungeschickt, alle Verbraucher im Fahrzeug, von der Beleuchtung bis zur Servolenkung, auf diese höhere Spannung umzustellen. In der Diskussion steht daher, eine zusätzliche Zwischenspannungsebene von 48 V zu verwenden, da für Gleichspannungen unter 60 V im Allgemeinen auf einen verstärkten Berührungsschutz verzichtet werden kann. Für eine solche Struktur werden dann Gleichspannungswandler (DC-DC-Konverter) benötigt, die ebenfalls Gegenstand von Forschungsprojekten des Fachgebiets LEA sind.

Energiebedarf für die Traktion

Der Energiebedarf von Fahrzeugen kann entweder auf die Betriebsdauer oder auf die zurückgelegte Wegstrecke bezogen werden. Da das Hauptanliegen meist darin besteht, eine bestimmte Strecke

zurückzulegen, wird typischerweise der strecken-spezifische Energiebedarf herangezogen. Dieser kann mit einer einfachen Modellierung der für die Bewegung des Fahrzeugs in Fahrtrichtung maßgebenden Kräfte abgeschätzt werden. Die wesentlichen Widerstandskräfte sind der Luftwiderstand, der Rollwiderstand und die Hangabtriebskraft. Bei Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen ändert sich zudem die kinetische Energie des Fahrzeugs. Ausgehend von einem Fahrspiel kann mit einem Fahrzeugmodell die notwendige mechanische Leistung berechnet werden. Zusätzlich muss im Rahmen der Verbrauchsberechnung berücksichtigt werden, auf welche Weise eine negative (bremsende) Antriebskraft beim jeweiligen Fahrzeug bereitgestellt wird. Bei konventionellen Fahrzeugen wird dies über das Schleppmoment des Verbrennungsmotors sowie die mechanische Bremse bewirkt. Dabei geht die kinetische Ener-



Quelle: Fachgebiet LEA

Abb. 3: Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ).

Masse (inkl. Fahrer)	1200 kg
Effektive Gesamttr�agheit	1300 kg
Wirksame Querschnittsfläche	2,07 m ²
Luftwiderstandsbeiwert	0,32
Rollwiderstandsbeiwert	0,009

Quelle: Fachgebiet LEA

Tab. 1: Fahrzeugparameter für Verbrauchsberechnung.

gie, beim Gefälle auch die potenzielle Energie, aus Antriebssicht vollständig verloren. Ein Vorteil elektrischer Antriebe besteht auch darin, dass diese als Bremsen wirken können und dabei die mechanische Energie zurück in elektrische Energie wandeln, die in die Batterie zurück gespeist werden kann. Zwar leistet diese Rekuperation einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Effizienz, doch darf nicht übersehen werden, dass aufgrund von Wandlungsverlusten die ursprüngliche Energie nicht mehr vollständig zurückgewonnen werden kann. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass je nach Fahrzeugstruktur eine gezielte Verteilung der über den elektrischen Antrieb gestellten Bremskraft auf die einzelnen Räder meist nicht möglich ist. Aus Gründen der Fahrzeugstabilität muss bei st arkeeren Bremsvorgängen die Bremskraft jedoch gezielt auf die Räder verteilt werden, so dass auch die mechanische Bremse zum Einsatz kommt. In diesem Fall muss bei der Verbrauchsberechnung die Zusammensetzung der Bremskraft modelliert werden, um die rekuperierte Energie korrekt gegen die Treibarbeit zu bilanzieren (Abbildung 3).

Seit dem 1. Januar 1996 wird in der Europäischen Union der NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) verwendet, um den Kraftstoffverbrauch von Kraftfahrzeugen unter standardisierten Bedingungen zu ermitteln. Das Geschwindigkeitsprofil des NEFZ ist in Abbildung 3 zu sehen. Dieser zeichnet sich durch verhältnismäßig sanfte Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge aus. Des Weiteren ist der NEFZ in zwei Subzyklen aufgeteilt: in einen ca. 13-minutigen Stadtzyklus (ECE15) und einen darauffolgenden  uberlandzyklus (EUDC). Es wird im Folgenden angenommen, dass die benötigte Bremskraft vollständig über den elektrischen Traktionsantrieb gestellt werden kann. Dadurch wird die kinetische Energie des Fahrzeugs abzüglich der Verluste an den Widerstandskräften vollständig mit einem angenommenen Wirkungsgrad von 60 Prozent rekuperiert (Tabelle 1).

Ausgehend von den Fahrzeugparametern in Tabel-

le 1 wurde der streckenspezifische Energiebedarf im NEFZ auf ebener Strecke berechnet. Die Fahrzeugparameter sind an den VW E-up! angelehnt. In Abbildung 4 ist die Zusammensetzung des streckenspezifischen Energiebedarfs ohne Berücksichtigung der Energierückgewinnung durch Rekuperation dargestellt. Die Arbeit am Luftwiderstand W_l macht bei den niedrigen Geschwindigkeiten im Stadtzyklus nur etwa 5 Prozent des Energiebedarfs aus, hat aber aufgrund der Abhängigkeit der Luftwiderstandskraft vom Quadrat der Geschwindigkeit einen deutlich höheren Einfluss im  uberlandzyklus. Die Arbeit am Rollwiderstand W_r ist in erster Näherung unabhängig von der Geschwindigkeit und variiert nur geringfügig. Im Stadtzyklus ergeben sich aufgrund der geringen mittleren Geschwindigkeit viele Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge pro zurückgelegter Strecke, was in einem hohen Energiebedarf für das Beschleunigen des Fahrzeugs W_b resultiert. Auch im  uberlandzyklus erfordert die Beschleunigung den höchsten Energieanteil. Während der Luftwiderstand unabhängig von der Fahrzeugmasse ist, sind der Rollwiderstand sowie der Beschleunigungswiderstand direkt proportional zur Fahrzeugmasse, so dass eine Gewichtsreduzierung sich unmittelbar über diese beiden Anteile auswirkt (Abbildung 4 und Abbildung 5).

Berücksichtigt man nun auch die Rekuperation bei Abbremsvorg angen, so wird der Einfluss der Masse auf den Energiebedarf durch die Rekuperation verringert. Bei einer höheren Fahrzeugmasse ergibt sich beim Beschleunigen ein höherer Energiebedarf, beim rekuperativen Bremsen wird aber auch mehr Energie zurückgewonnen. Die Masse hat dennoch über den Rollwiderstand sowie auch über die unvermeidlichen Verluste bei der Rekuperation immer noch einen beträchtlichen Einfluss auf den Energiebedarf des Fahrzeugs. In Abbildung 5 ist die Änderung des Energiebedarfs bei einer Minderung (blau) bzw. Erhöhung (grün) der Fahrzeugmasse um 10 Prozent dargestellt. Die größte Einsparung aufgrund eines verringerten

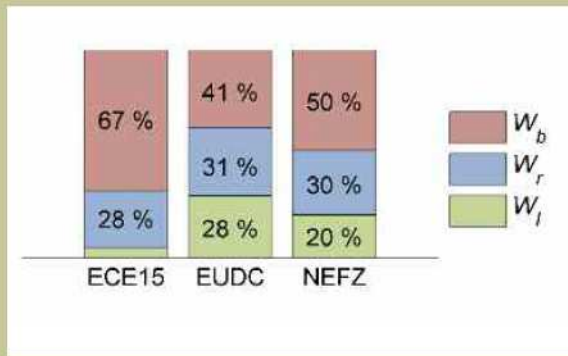


Abb. 4: Zusammensetzung des Energiebedarfs in treibenden Phasen.

Quelle: Fachgebiet LEA

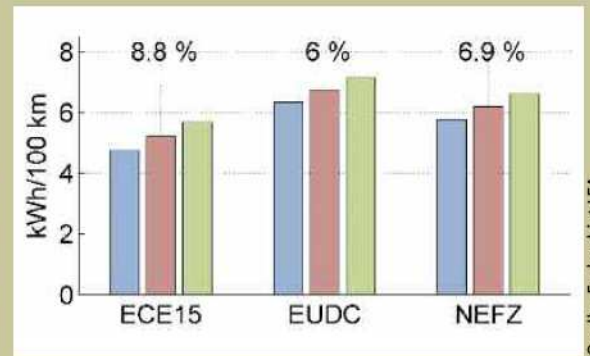


Abb. 5: Änderung des Energiebedarfs bei einer Änderung des Gewichts um 10 Prozent.

Quelle: Fachgebiet LEA

Fahrzeuggewichts resultiert im Stadtverkehr aus einer hohen Anzahl an Abbrems- und Anfahrvorgängen. Daraus resultiert unmittelbar ein Vorteil rein elektrisch angetriebener Fahrzeuge gegenüber einem Plug-In-Hybrid bei rein elektrischem Fahren: Ein Plug-in-Hybrid bietet zwar die Sicherheit, bei entladener Batterie nicht liegen zu bleiben, das Gewicht des Verbrennungsmotors erhöht jedoch den Energiebedarf erheblich.

Bei den obigen Berechnungen wird von der mechanischen Leistung bzw. Arbeit ausgegangen, die der Antrieb an seiner Welle bereitstellen muss. Natürlich ist hier wieder das Ziel, diese mechanische Arbeit mit einem möglichst geringen Einsatz an elektrischer Energie zu erbringen, also den Wirkungsgrad des Antriebs zu maximieren. Die Lösung dieser Aufgabe ist nicht so offensichtlich wie es zunächst erscheinen mag, denn die Effizienz des elektrischen Antriebs wird durch die gewählte magnetische Erregung des Motors, die Abweichungen der Ströme von der idealen Sinusform und die Verluste in dem den Motor speisenden Antriebsumrichter beeinflusst. Das Fachgebiet LEA forscht seit über zehn Jahren an Fragestellungen zur optimalen Betriebsführung durch eine geschickte Steuerung und Regelung des Antriebs. Hierbei spielt die Hochausnutzung der Motoren eine besondere Rolle. Wegen des erwähnten Gewichtsproblems ist man in der Automobiltechnik bestrebt, soweit wie irgend möglich die Masse zu reduzieren, was ein starkes nichtlineares Verhalten des Motors bedingt.

Einfluss von Nebenaggregaten auf die Reichweite

Auch der Energiebedarf der Nebenaggregate rückt bei begrenzten Energiespeichern stärker als bisher in den Fokus. Aus der Übersicht in Tabelle 2 geht hervor, dass diese Verbraucher zusätzlich zum Antrieb rund 2 kW Leistung benötigen. Dieser Leistungsbedarf besteht unabhängig von den

eigentlichen Antriebsanforderungen und muss ebenfalls aus mitgeführten Energiespeichern gedeckt werden. Vergleicht man dies mit der mittleren Antriebsleistung im NEFZ von nur ca. 2,7 kW für ein Kleinfahrzeug wird schnell klar, dass Nebenaggregate einen wesentlichen Einfluss auf die erzielbare Reichweite bei gegebenem Energievorrat haben. Als Beispiel: Aus der vollgeladenen Batterie des Volkswagen e-up! können ca. 14 kWh elektrische Energie entnommen werden. Ohne Nebenaggregate kann damit rechnerisch eine Reichweite von ca. 170 km erzielt werden, unter Einberechnung dieser sind es weniger als 100 km (Tabelle 2).

Da die Klimaanlage mit Abstand den größten Verbraucher unter den Nebenaggregaten darstellt, laufen zurzeit eine Vielzahl von Untersuchungen zur Verbesserung ihrer Effizienz. Man verspricht sich durch optimierte Kältemittel und verbesserte Kompressoren Einsparungen bezüglich der elektrischen Leistung von bis zu 30 Prozent. Auch gilt es zu bedenken, dass beim hocheffizienten Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen kaum Abwärme anfällt, welche im Winter zum Heizen des Fahrzeugs verwendet werden kann. Im Unterschied zu konventionellen Fahrzeugen, bei denen die Abwärme des Verbrennungsmotors ohnehin abgeführt werden muss, ist daher eine zusätzliche Heizmöglichkeit vorzusehen. Diese kann z. B. durch eine Wärmepumpe bereitgestellt werden, die platz- und gewichtsparend als kombiniertes Heiz- und Kühlaggregat einsetzbar ist.

Die aufgenommene elektrische Leistung von Servolenkung, Wankstabilisator, Pumpen und Gebläsen wird im Wesentlichen durch die Effizienz der eingesetzten elektrischen Kleinantriebe in diesen Komponenten bestimmt. Insbesondere durch den Einsatz eines Mehrspannungsbordnetzes können diese Kleinantriebe effizienter ausgelegt bzw. betrieben und Verbrauchseinsparungen in der Größenordnung von 10 Prozent erzielt

Komponenten	Leistung in W
Klimaanlage	1 000
Servolenkung	200
Front- und Heckscheibenheizung	200
Wankstabilisator	150
Beleuchtung	140
Wasserpumpe	100
Entertainment/Radio	75
Kühlergebläse	50
Elektromechanische Bremse	50
Sitzheizung	30
Sonstiges z.B. Scheibenwischer, Pumpen,...	30
Summe:	2 025

Quelle: Fachgebiet LEA

Tab. 2: Mittlere Leistungsaufnahme von Nebenaggregaten im E-Fahrzeug.

werden. Auch im Bereich der Fahrzeugbeleuchtung sind weitere Leistungseinsparungen durch moderne LED-Technik möglich, wobei im Bereich des leistungsintensiven Abblend- und Fernlichts in den nächsten Jahren Leistungseinsparungen von bis zu 40 Prozent zu erwarten sind. Bei den weiteren Komponenten ist eine Verringerung der durchschnittlichen Leistungsaufnahme nicht abzusehen bzw. sogar eine Erhöhung möglich, z. B. durch den stetig zunehmenden Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien im Fahrzeug. Dem Trade-Off zwischen Komfort (Klimaanlage, Heizung) und Reichweite (als auch streckenspezifischer Verbrauch), welchen jeder Fahrer individuell bewerten muss, kommt daher eine deutlich höhere Bedeutung zu, als dies bei konventionellen Fahrzeugen der Fall ist.

Aufladen des Energiespeichers

Die Akzeptanz der Elektromobilität hängt neben der Reichweite nicht zuletzt davon ab, wie komfortabel dem Nutzer das Laden der Batterie ermöglicht wird. Erwartungsgemäß wird ein Großteil der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge mit On-Board Ladegeräten ausgestattet sein, die das Laden am öffentlichen Versorgungsnetz erlauben. Die maximale Dauerleistung aus einer konventionellen Schutzkontaktsteckdose ist allerdings auf etwa 2,5 kW beschränkt. Für den Ladevorgang über

Nacht mag diese Ladeleistung akzeptabel sein, zeitkritische Ladevorgänge wird der Nutzer damit aber nicht realisieren können. Notwendig sind demnach höhere Ladeleistungen, die entweder über das öffentliche Drehstromnetz oder per direkter Gleichstromladung an das Elektrofahrzeug übertragen werden. Die Gleichstromladung ermöglicht die Einsparung eines zusätzlichen Hochleistungsladers an Bord des Fahrzeugs, da eine stationäre Ladesäule die Ladeleistung an die Batteriespannung anpasst. Um die Reichweite der Fahrzeuge zu steigern, sind für den On-Board-Lader primär zwei Ziele entscheidend: Die Reduktion der Masse und die Reduktion des Bauvolumens. Zwar hat die Effizienz des Laders keinen direkten Einfluss auf die Reichweite des Fahrzeugs, dennoch stellt diese eine weitere wichtige Komponente dar, um den Gesamtwirkungsgrad des Fahrzeugs zu erhöhen. In der Diskussion zur Energiewende werden auch häufig bidirektionale Topologien vorgeschlagen, welche eine Einspeisung von elektrischer Leistung aus den Energiespeichern der Fahrzeuge in das Stromnetz ermöglichen (vehicle-to-grid). Dem Vorteil einer erhöhten Netzstabilität durch die verfügbaren Leistungsreserven der Fahrzeugspeicher stehen Nachteile durch eine erhöhte Systemkomplexität und Kosten für die aufwändigeren Ladegeräte gegenüber.



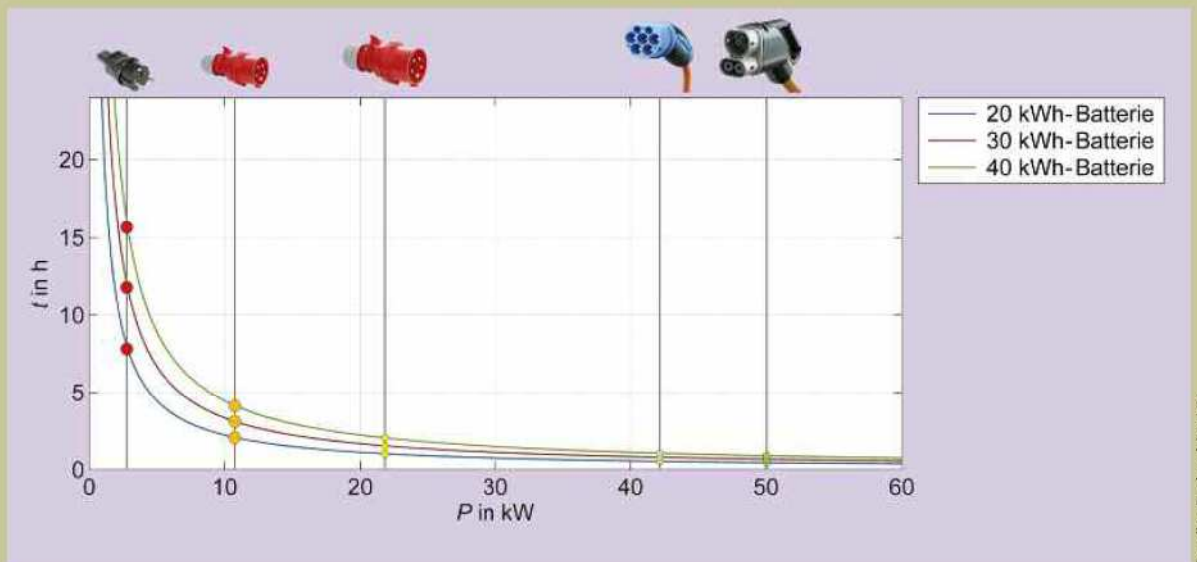


Abb. 6: Ladezeit für übliche Batterien bei unterschiedlichen Ladeleistungen.

Quelle: Fachgebiet LEA

Im Fachgebiet LEA wird an unterschiedlichen schaltungstechnischen Realisierungen von Ladegeräten, die zukünftig für das Laden von Elektrofahrzeugen verwendet werden, geforscht. Zwei entscheidende Anforderungen, die an das Ladegerät gestellt werden, sind zum einen eine galvanische Trennung zwischen Batterie und Versorgungsnetz und zum anderen die netzfremdliche Stromaufnahme. Häufig werden für diese Aufgaben zwei separate Wandlerstufen verwendet, die durch einen Spannungszwischenkreis entkoppelt sind und somit für die Aufgaben gezielt ausgelegt werden können. In der Diskussion steht, diese beiden Stufen zu einer Topologie zu vereinen. Ob diese einstufige Topologie zu der angestrebten Reduktion der Masse und des Bauraums führt, wird derzeit in einem Kooperationsprojekt im Rahmen des Spitzenclusters it's OWL untersucht.

Fazit

Die Elektromobilität ist sowohl ein vielfältiger als auch herausfordernder Technologie- und Forschungskomplex, welcher sich durch ein hohes Maß an Interdisziplinarität auszeichnet. Insbesondere die verschiedenen Formen (elektrischer) Energiespeicher und die effiziente Nutzung der verfügbaren Energie im Fahrzeug bergen noch hohes Optimierungspotenzial. Im direkten Vergleich zu konventionell verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen gilt es jedoch zu bedenken, dass diese ihren aktuell hohen Entwicklungsstand auch nicht über Nacht erreicht haben und sich die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Automobilsektor in den letzten 100 Jahren fast ausschließlich auf diese Antriebsart fokussiert haben.

Quellen

J. BÖCKER: „ANTRIEBE FÜR UMWELTFREUNDLICHE FAHRZEUGE“, SKRIPTUM UNIVERSITÄT PADERBORN, 2013.

J. BÖCKER, T. HUBER, C. ROMAUS, A. SPECHT: „ELEKTROMOBILITÄT IN PADERBORN“ IN FORSCHUNGSFORUM PADERBORN, 2011.

J. BÖCKER ET AL.: „REGELUNG ELEKTRISCHER TRAKTIONSANTRIEBE IN ELEKTRO- UND HYBRIDFAHRZEUGEN“, IN AT – AUTOMATISIERUNGSTECHNIK, VOL. 58, No. 10, 2010.

H. BRAESS, U. SEIFFERT (HRSG.): „HANDBUCH KRAFTFAHRZEUGTECHNIK“, FRIEDR. VIEWEG & SOHN VERLAG, 2013.

W. PETERS: „WIRKUNGSGRADOPTIMALE REGELUNG VON PERMANENTERREGTEN SYNCHROMOTOREN IN AUTOMOBILEN TRAKTIONSANWENDUNGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER MAGNETISCHEN SÄTTIGUNG“, DISSERTATION, UNIVERSITÄT PADERBORN, 2015.

H. PROFF, J. SCHÖNHARTING, D. SCHRAMM, J. ZIEGLER (HRSG.): „ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN IN DER MOBILITÄT“, GABLER VERLAG, 2012.

VERBAND DER ELEKTROTECHNIK, ELEKTRONIK UND INFORMATIONSTECHNIK (HRSG.): „VDE-STUDIE: E-MOBILITY 2020“, VDE-VERLAG, 2010.

H. WALLENTOWITZ, K. REIF (HRSG.): „HANDBUCH KRAFTFAHRZEUGELEKTRONIK“, FRIEDR. VIEWEG & SOHN VERLAG, 2006.



M.Sc. Lukas Keuck ist seit Januar 2013 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet LEA tätig. Er studierte Elektrotechnik in Rahmen eines kooperativen Studiums mit der AEG Power Solutions an der FH-SWF Soest und der University of Bolton (UK). Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf dem Entwurf von Stromrichtern und deren Regelung für elektrisch angetriebene Fahrzeuge.



Dipl.-Ing. Wilhelm Peters ist seit Januar 2014 als Oberingenieur am Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik tätig. Er studierte Elektrotechnik und Informationstechnik an der Universität Paderborn. Seit November 2008 erforschte er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet LEA die Modellierung und Regelung von permanenterregten Synchronmotoren in automobilen Traktionsanwendungen.



M.Sc. Oliver Wallscheid ist seit November 2012 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet LEA tätig. Sein aktueller Forschungsschwerpunkt liegt auf der thermischen Modellierung von hochausgenutzten permanenterregten Synchronmotoren und der Berücksichtigung von Temperatureffekten aus regelungstechnischer Sicht.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker

Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik

Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik, Institut Elektrotechnik

05251 60-2209

boecker@lea.uni-paderborn.de



Hierarchisches Lastmanagement bei Haushaltsgeräten

KARL STEPHAN STILLE

Dieses Kapitel zeigt, wie Haushaltsgeräte ihre Leistungsaufnahme verschieben und anpassen können um bestmöglich den Ansprüchen von Erzeugung und Netz zu genügen. Zunächst wird auf den aktuellen Privatkundenstrommarkt und notwendige Veränderungen eingegangen. Nach einer kurzen Klassifikation der Geräteklassen wird das Konzept der hierarchischen Lastoptimierung vorgestellt. Dieser Teil unterteilt sich nochmals in die Gesamtstruktur, die einzelnen Funktionen und die Zielfunktionen der Systemkomponenten.

Vorüberlegungen

Stromtarife

Im Bereich der flexiblen Stromtarife gibt es bisher nur statische Tarife mit festen Tarifstufen und Schaltzeiten. Im Allgemeinen beschränkt sich die Variabilität allerdings auf einen Tag- und einen Nachtarif, wie sie von jedem Grundversorger, hauptsächlich für Elektro-Nachtspeicherheizungen angeboten werden. Einige wenige EVU bieten auch Tarife an, bei denen es mehr Tarifstufen und mehr Schaltzeiten gibt. Die meisten dieser Tarife bieten dann einen Tag-, einen Nacht- und einen Wochenendtarif.

Für Privatkunden sind aber bisher keine Stromtarife auf dem Markt, die in irgendeiner Weise mit weniger als einem Monat Auflösung auf Schwankungen der Erzeugung oder des Marktpreises reagieren.

Da der Anteil an erneuerbaren Energien stark steigt, sind solche Tarifmodelle nicht mehr adäquat und sollten zum Ausgleich von Verbrauch und Erzeugung durch variable Tarife ersetzt werden. Mit dem Roll-Out der Smart-Meter, die in der Lage sind in Echtzeit den Stromverbrauch aufzuzeichnen, zu speichern und an den Messstellenbetreiber zu übertragen, werden neue Möglichkeiten für variable Tarife eröffnet.

Flexibilität von Haushaltsgeräten

Bisher gibt es nur sehr wenige Haushaltsgeräte, die Lastverschiebungsfunktionen implementiert haben. Aber auch diese Funktionen beschränken sich auf eine reine zeitliche Verschiebung, gesteuert durch eine zentrale Instanz, die den Betrieb an einen variablen Stromtarif anpasst. Zusätzlich könnte der Betrieb von Haushaltsgeräten wie Waschmaschinen, Spülmaschinen, Trocknern und

Waschtrocknern aber auch unterbrochen werden. Bei einem stark fluktuierenden Strompreis könnte dies dazu genutzt werden, den Geräteprozess auf mehrere Niedrigpreisphasen aufzuteilen.

Bei Waschprogrammen lässt sich z.B. das gleiche Ergebnis (die Reinheit der Wäsche) durch mehr Energie bzw. höhere Temperatur oder längere Waschzeit erreichen.

Wenn der Strompreis nur für eine kurze Zeitspanne günstig ist, kann es rentabler sein, das schnelle Programm zu nutzen, um die gesamte Energie in dieser Niedrigpreisphase aufzunehmen. Für die Auswahl eines optimalen Betriebspunkts müssen all diese Faktoren in Betracht gezogen werden.

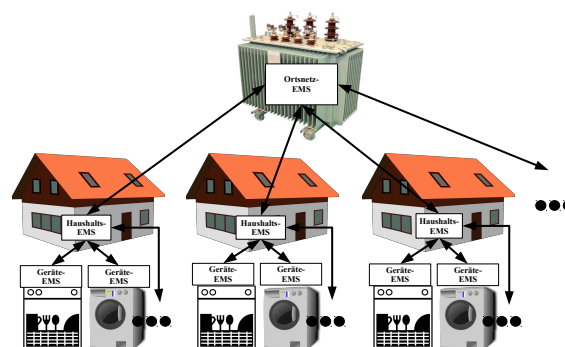


Fig. 2: Hierarchische Struktur der Energiemanagementsysteme und deren Kommunikation

Struktur und Funktionen der Energiemanagementsysteme

Abb. 2 zeigt die Struktur des Energiemanagementsystems (EMS). Es basiert auf einer Hierarchie mit drei Ebenen. Auf oberster Ebene befindet sich das OEMS, das in der Ortsnetzstation verbaut ist. Darunterliegend ist jeder Haushalt mit einem HEMS ausgerüstet. Auf unterster Ebene verfügen die steuerbaren Haushaltsgeräte über ein GEMS. Die Optimierung auf den verschiedenen Ebenen findet nach den in Tabelle 1 dargestellten Zielfunktionen statt.

Optimierung auf Geräteebene

Auf der untersten Ebene muss jedes steuerbare Gerät mit einem Geräte-Energiemanagementsystem ausgestattet sein. Dieses System übernimmt alle gerätespezifischen Funktionen des Energiemanagements. Im Gegensatz zu zentralisierten Optimierungen, bei denen das jeweilige Gerät nur ein Startsignal von einer zentralen Steuerinstanz erhält und diese Zentrale alle Details über das Gerät kennen muss, können bei einer lokalen Optimierung sensible proprietäre

Ebene	Zielfunktion
GEMS	Minimierung der Gesamtstromkosten für den Prozessdurchlauf des Geräts.
	Minimierung der Prozesslaufzeit bei umplanbaren Geräten
HEMS	Minimierung der Gesamtstromkosten des Haushalts.
	Maximierung der Gleichförmigkeit der aus dem Netz entnommenen Leistung.
OEMS	Minimierung von Leistungsspitzen und Maximalleistung im Ortsnetz.
	Minimierung der Extra-Kosten durch sub-optimale Betriebspunkte der unterlagerten Häuser und Geräte.
	Gleichmäßige Aufteilung der Zusatzkosten auf die Haushalte.

Tabelle 1: Optimierungs-Zielfunktionen auf den verschiedenen Hierarchieebenen.

gerätespezifische Informationen gekapselt und so vor nicht autorisiertem Zugriff geschützt werden. Es werden nur voroptimierte und abstrahierte Betriebspunkte an die nächsthöhere Instanz auf Haushaltsebene (also das HEMS) weitergegeben. Das GEMS muss den zeitlichen Verlauf des Preises für elektrische Energie bis zum Planungshorizont T_{plan} kennen, um eine Optimierung auf minimale Kosten durchführen zu können. Eine Zielfunktion der Optimierung auf Geräteebene ist immer die Minimierung der Gesamtkosten des Prozesses. Da nur diese lokal voroptimierten Möglichkeiten an das überlagerte EMS (das HEMS) weiter gegeben werden, wird die Komplexität der dortigen Optimierung deutlich reduziert.

Die Zielfunktionen in mathematischer Form:

$$f_{G,1} = \int_0^{T_{\text{plan}}} P_G(\tau) \cdot c(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$f_{G,2} = T_{\text{end}} \leq t_{\text{Frist}} \quad (2)$$

wobei $c(t)$ den Preisverlauf für elektrische Energie und $P_G(t)$ der Leistungsverlauf des Geräts, der von der Gerätesteuerung geliefert werden muss, ist. Der Zeitpunkt des Prozessendes des Geräts wird mit T_{end} bezeichnet.

Eine Randbedingung der Optimierung wird durch den Planungshorizont T_{plan} definiert.

Weitere Randbedingungen definiert der Benutzer durch Vorgabe von Betriebs- und Verbotzeiträumen. So wird zum Beispiel der Hausordnung in einem Mietshaus Rechnung getragen, die einen Waschmaschinenbetrieb in der Nacht verbietet. Die wichtigste Randbedingung für die Optimierung ist aber die Vorgabe des spätestmöglichen Prozessendes T_{Frist} durch den Benutzer.

Optimierung auf Haushaltsebene

Da die einzelnen GEMSe schon darauf optimieren, den kostengünstigsten Arbeitspunkt auszuwählen (unter Berücksichtigung der Prozessgesamtdauer),

würde eine Einzielloptimierung auf die Gesamtstromkosten nur eine Bestätigung der Lösungen liefern, die von den GEMSen gefunden wurden. Ein großer Nachteil dieser Betriebsart, die dieselben Ergebnisse liefert wie eine unkoordinierte lokale Optimierung auf den einzelnen Geräten, ist die Tatsache, dass die meisten GEMSe den Hauptteil ihrer Leistungsaufnahme in die Zeit des geringsten Preises legen. Bei einer hohen Marktdurchdringung von solchen intelligenten Geräten hätte dies womöglich direkt eine Überkompensation zur Folge. Aus der erwünschten Lastverschiebung zur Leistungsvergleichmäßigung würde so sogar eine neu geschaffene Spitze beim Preisminimum. Um diesem Verhalten vorzubeugen, wird eine zweite Zielfunktion eingeführt werden, die Leistungsungleichmäßigkeit repräsentiert.

Die Optimierung auf Haushaltsebene muss den Vertrag zwischen Kunde und EVU berücksichtigen. Daher bildet die erste Zielfunktion $f_{H,1}$ direkt die Gesamtkosten, also die Stromrechnung, des Kunden ab.

Die Zielfunktionen auf HEMS-Ebene lauten somit:

$$f_{H,1} = \sum_g^{n_G} f_{G,1,g} \quad (3)$$

$$f_{H,2} = \int_0^{T_{\text{plan}}} \left(P_{\text{ref}}(\tau) - \sum_g P_{G,g}(\tau) \right)^2 d\tau \quad (4)$$

Um dem Optimierungsalgorithmus die Möglichkeit zu geben, diese Zielfunktionen zu minimieren, muss das HEMS mit einer gewissen Untermenge der möglichen Leistungsverläufe, sowie deren Zielfunktionswerten $f_{G,1,g}$ (Kosten) versorgt werden. Um dem HEMS Optimierungsspielraum zu geben, werden auch suboptimale Lösungen berücksichtigt.

Optimierung auf Ortsnetzebene

Das Ortsnetz-Energiemanagementsystem hat als Hauptziel, die Ausnutzung von Ortsnetzstation und

Netzinfrastruktur zu maximieren. Da das Netz für die Maximalleistung ausgelegt sein muss, ist es vorteilhaft, diese, also vor allem die Leistungsspitzen, auf ein Minimum zu reduzieren. Die Reduktion der Maximalleistung, also hauptsächlich die Reduktion der Leistungsspitzen, ist daher die primäre Zielfunktion des OEMS.

Das OEMS befindet sich im Zuständigkeitsbereich des Netzbetreibers, die HEMSe dagegen liegen im Zuständigkeitsbereich der Stromkunden.

Da die Optimierung im OEMS Einfluss auf die Betriebspunkte der Haushalte nimmt, können diese meist nicht an ihrem Kostenoptimum arbeiten. Deshalb entstehen dem Kunden zusätzliche Kosten, da er den Strom zu einem etwas höheren Preis beziehen muss. Dies führt direkt zur zweiten Zielfunktion, der Minimierung der zusätzlichen Kosten durch angewiesenen suboptimalen Betrieb. Diese Optimierung führt aber nicht notwendigerweise zu einer fairen Verteilung der Zusatzkosten auf alle Haushalte im Ortsnetz. Deshalb ist noch eine dritte Zielfunktion notwendig, die die Zusatzkosten im Abrechnungszeitraum gleichmäßig, nach Gesamtverbrauch gewichtet, auf alle Kunden verteilt.

Die Zielfunktionen auf Ortsnetzebene können mathematisch formuliert werden als:

$$f_{O,1} = \max_{0 \leq t \leq T_{\text{plan}}} \left(\sum_{h=1}^{n_H} P_{H,h}(t) \right) \quad (5)$$

$$f_{O,2} = \sum_{h=1}^{n_H} \Delta C_{H,h}(T_{\text{plan}}) \quad (6)$$

$$f_{O,3} = \sum_{h=1}^{n_H} [(\Delta C_{H,h}(T_{\text{Abr}})) - \overline{\Delta C}(T_{\text{Abr}})]^2 \quad (7)$$

wobei T_{Abr} die Abrechnungsperiode des Stromversorgers definiert und n_H die Anzahl der Haushalte im Ortsnetz.

$\Delta C_{H,h}(T) \geq 0$ bezeichnet die Zusatzkosten, die dem Haushalt h entstehen, weil er einen, gegenüber dem haushalts-lokalen Optimum $P_{H,h,\text{opt}}$, suboptimalen Betriebspunkt ausführen muss, normiert auf den Gesamtstromverbrauch des Haushalts $C_{H,h}(T)$. Das Optimierungsproblem muss dabei der Rahmenbedingung

$$f_{O,1} \leq P_{O,\text{nom}} \quad (8)$$

genügen, die besagt, dass die maximale Leistung im Ortsnetz die Nominalleistung $P_{O,\text{nom}}$ nicht übersteigen darf.

Fazit

Das vorgestellte Konzept eines Energiemanagements mit Laststeuerung erlaubt eine mehrstufi-

ge, dezentrale Optimierung von steuerbaren Haushaltsgeräten, die über den Zuständigkeitsbereich des einzelnen Kunden hinausreicht. Durch die Ergänzung eines Energiemanagements im Ortsnetz und das damit verbundene Verlassen der Anwendungsbereiche der einzelnen Stromlieferverträge, können auch Anforderungen des Verteilnetzes berücksichtigt werden. Durch die Optimierung werden die Informationen, die an eine höhere Ebene weitergegeben werden, reduziert und abstrahiert. Einerseits gibt dies den Geräten die Möglichkeit, ihre Fähigkeiten vollständig nutzen zu können, ohne Firmen-Know-How des Herstellers an ein anderes System weitergeben zu müssen. Andererseits wird durch die lokale Optimierung die Komplexität der Optimierung auf den höheren Ebenen deutlich reduziert.

Energiespeicher in industriellen Microgrids THORSTEN VOGT

Einleitung

Die Integration erneuerbarer Energien birgt sowohl technische als auch wirtschaftliche Herausforderungen. In einem industriellen Microgrid wird die Versorgung der verschiedenen Verbraucher eines Unternehmens neben dem Netzanschluss durch lokale Erzeuger und Speicher realisiert. Die Grundidee ist, durch lokale Koordination der verschiedenen Komponenten den Gesamtnutzen des Systems zu maximieren. Dabei ist das vorrangige Ziel, die Versorgungskosten für den Betreiber zu minimieren. Ein solches System ist allerdings auch in der Lage, beispielsweise durch Reaktion auf die Netzfrequenz, einen Beitrag zur Stabilisierung des Netzes zu leisten und die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Somit kann ein Microgrid sowohl zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit als auch zur technischen Unterstützung der Integration erneuerbarer Energien beitragen.

Da die elektrischen Erzeuger in einem solchen System, z.B. PV-Anlagen, Windkraftanlagen oder BHKWs, nicht beliebig steuerbar sind, werden Speicher eingesetzt, um Freiheitsgrade zur Beeinflussung des Leistungsverlaufs am Netzanschlusspunkt zu schaffen. Elektrische Energiespeicher wie z.B. Blei- und Lithium-Akkumulatoren, Schwungmassenspeicher, aber auch neuere Speichertechnologien wie z.B. Redox-Flow-Akkumulatoren können dabei zum Einsatz kommen. Dem Einsatz von Speichern stehen typischerweise die hohen Anschaffungskosten des Speichersystems entgegen. Daher ist es notwendig, den Speicher bestmöglich auszunutzen, um einen finanziellen Vorteil zu erreichen. Dies kann nur mit entsprechenden Betriebsführungsstrategien erreicht werden.

Industrieunternehmen verfügen aufgrund des hohen elektrischen Energiebedarfs oftmals über eine registrierende Leistungsmessung (ab einem Bezug von 100 MWh pro Jahr). Dabei wird nicht nur die elektrische Energie, sondern auch die maximal entnommene elektrische Leistung im Abrechnungszeitraum in Rechnung gestellt (Aufteilung in Arbeits- und Leistungskosten). Geht man weiterhin davon aus, dass die Vergütung der ins Versorgungsnetz eingespeisten elektrischen Energie deutlich geringer ist als die Kosten der aus dem Versorgungsnetz bezogenen elektrischen Energie, so ergeben sich zunächst zwei Möglichkeiten der Kosteneinsparung durch den Energiespeichereinsatz. Zum einen die Spitzenleistungsreduktion (auch Peak Shaving) und zum anderen die Eigenverbrauchssteigerung. Beide Begriffe werden in der Literatur in unterschiedlichem Kontext verwendet (z.B. in [1] im Kontext der PV-Einspeisung). Daher wird im Folgenden diese Kosteneinsparungsmöglichkeiten anhand der entsprechenden Speicherbetriebsstrategien bezogen auf die Anwendung in industriellen Microgrids beschrieben.

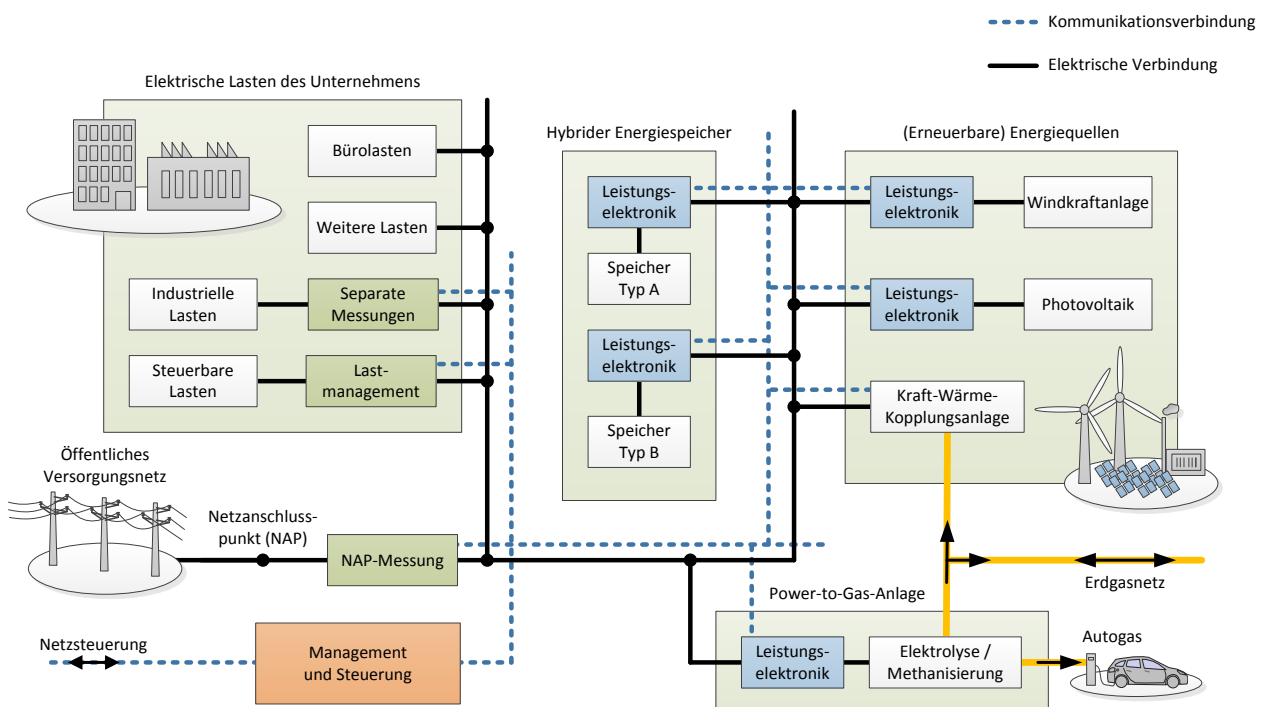


Fig. 3: Beispielstruktur eines netzgekoppelten industriellen Microgrids

Speicherbetriebsstrategien

Zur Betrachtung der Speicherbetriebsstrategien ist es sinnvoll, das Microgrid zunächst zu abstrahieren (4). Hierbei werden die einzelnen Komponenten zu Gruppen zusammengefasst (Lasten, Erzeuger und Speicher) und die im Folgenden betrachteten (virtuellen) Leistungsverläufe zugeordnet.

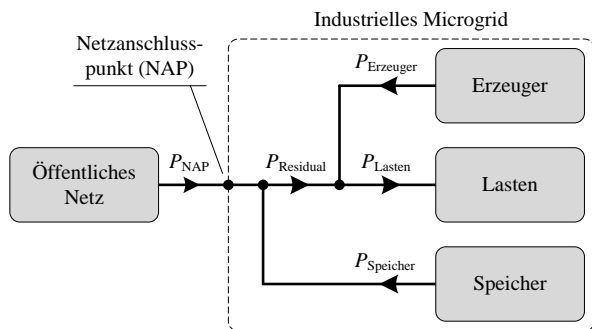


Fig. 4: Blockdiagramm des industriellen Microgrids

Zur Entwicklung von Speicherbetriebsstrategien ist im Wesentlichen die Residualleistung $P_{Residual}$ zu betrachten. Da die Kostenabrechnung des Netzbetreibers auf Mittelwerten im 15 Minuten Raster der Leistung am Netzanschlusspunkt P_{NAP} basiert, ist auch diese zeitdiskrete Mittelwertbetrachtung der Residualleistung zweckmäßig.

Separate Zielsetzung

Soll entweder die Spitzenleistungsreduktion oder die Eigenverbrauchssteigerung erzielt werden, ergeben sich relativ einfache Regeln für die Speicherbetriebsführung. Für die Spitzenleistungsreduktion muss jedoch zuvor eine Leistungsschwelle P_T definiert werden, die angibt, bis zu welchem Wert die Leistung am NAP reduziert werden soll. Bei der Ermittlung dieser Schwelle müssen neben dem zu erwartenden Residualleistungsverlauf auch Speicherparameter wie Nennleistung, verfügbarer Energieinhalt, Wirkungsgrad berücksichtigt werden. Dazu wird in [2] ein mögliches Vorgehen gezeigt. Abhängig von der Wahl der Leistungsschwelle können zwei Situationen auftreten, die zu einem ungewollten Überschreiten der Schwelle führen. Zum einen kann die geforderte Leistung zur Einhaltung der Schwelle die Maximalleistung des Speichers überschreiten. Zum anderen kann die Entladegrenze des Speichers während der Entladung erreicht werden. Gerade der zweite Fall kann dazu führen, dass sich die Maximalleistung am NAP nicht verändert und somit der Speicher keinerlei Beitrag zur Kostenreduktion erbringt. Daher ist eine adäquate Wahl der Leistungsschwelle P_T besonders wichtig. Ist diese Schwelle

bestimmt, wird der Speicher oberhalb der Schwelle entladen und unterhalb der Schwelle wieder geladen. In 5 wird an einem beispielhaften Residualleistungsverlauf der Verlauf der Leistung am NAP und der Verlauf des Speicherenergieinhaltes für die Speicherbetriebsstrategie zur Spitzenleistungsreduktion gezeigt.

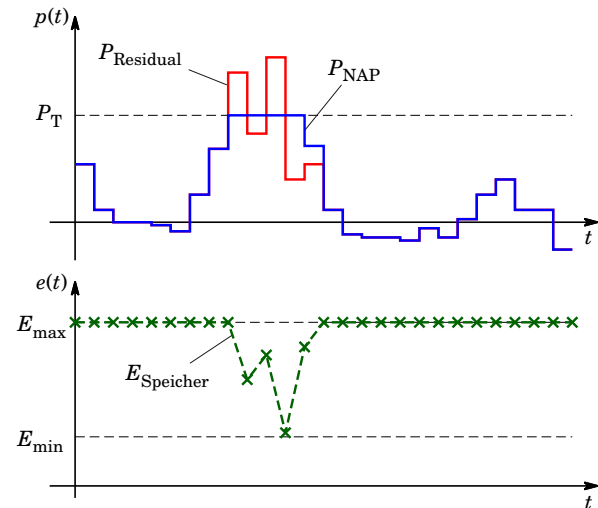


Fig. 5: Beispiel zur Spitzenleistungsreduktion

Zur Eigenverbrauchssteigerung wird der Speicher wiederum immer dann geladen, wenn die Residualleistung negativ ist und immer dann entladen, wenn die Residualleistung positiv ist. Dabei ist lediglich darauf zu achten, dass der Ladezustand des Speichers die Systembegrenzungen (E_{min} und E_{max}) einhält. 6 zeigt für den gleichen Residualleistungsverlauf die entsprechenden Ergebnisse einer Speicherbetriebsstrategie zur Eigenverbrauchssteigerung.

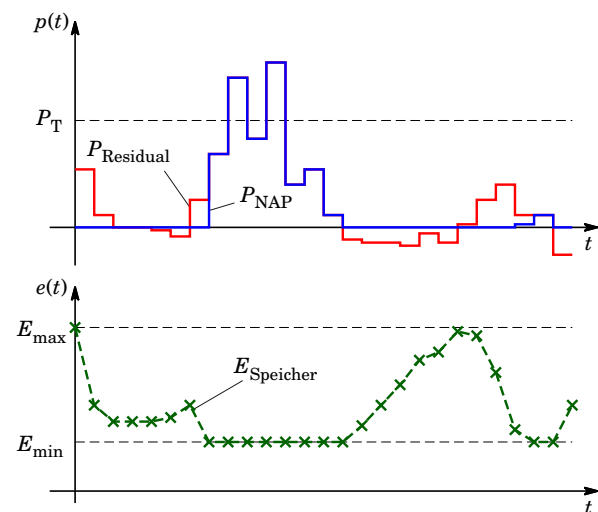


Fig. 6: Beispiel zur Eigenverbrauchssteigerung

Die Festlegung der Entladegrenze E_{min} ist ein Bestandteil der Speicherauslegung und abhängig von

der Zyklusfestigkeit des Speichers. Die Auslegung selbst würde nun zu weit führen und daher wird im Folgenden davon ausgegangen, dass sowohl E_{\min} also auch P_T bereits bestimmt sind.

Kombinierte Zielsetzung

Zur Erreichung von Eigenverbrauchssteigerung und Spitzenleistungsreduktion können die Regeln der separaten Zielsetzung nicht einfach kombiniert werden. Dies wird bei der Betrachtung des Speicherladegradverlaufs deutlich. Bei einer rein auf Eigenverbrauchssteigerung ausgelegten Betriebsstrategie wird der Speicher, sobald die Residualleistung positiv wird, bis zur Speicherendladegrenze entladen. Treten im weiteren Verlauf Spitzenleistungen auf, kann der Speicher nicht mehr reagieren. Bei einer rein auf Spitzenleistungsreduktion ausgelegten Betriebsstrategie wird der Speicher vollständig geladen, sobald die Residualleistung den Schwellwert P_T unterschreitet. Wird die Residualleistung im weiteren Verlauf negativ, kann der Speicher keine weitere Energie aufnehmen. Somit bleibt eine mögliche Eigenverbrauchssteigerung aus.

Aus diesen Gründen wurde eine Methodik entwickelt, welche auf der Theorie der modellprädiktiven Regelung basiert, wie sie im Allgemeinen z.B. in [3] umfassend erklärt wird. Die Grundbestandteile dieser Methodik werden in 7 für den Anwendungsfall im industriellen Microgrid gezeigt.

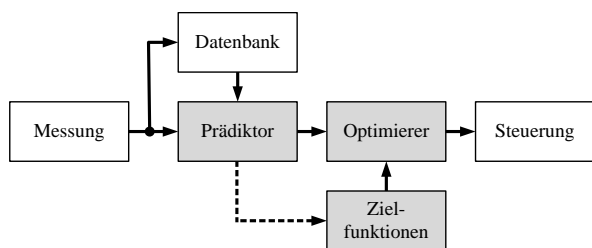


Fig. 7: Bestandteile der Betriebsführung

Um die Betriebsführung zu konfigurieren, müssen zunächst Zielfunktionen vorgegeben werden. Diese Zielfunktionen beinhalten letztlich alle komponentenspezifischen Informationen, die bei der Betriebsführung betrachtet werden sollen. Hierzu sind Informationen über die Kostenabrechnung aus dem Versorgungsvertrag, der Selbstentladung und des leistungsabhängigen Wirkungsgrads unterschiedlicher Speicher, aber auch Informationen bezüglich eines Lastmanagements denkbar.

Auf Grundlage der Prädiktion und der Zielfunktionen ermittelt schließlich ein Optimierungsverfahren den Verlauf der Leistungsaufteilung zwischen Speicher- und NAP, der über den gesamten Prä-

diktionshorizont zur geringsten Summe der Zielfunktionswerte führt. Eine Besonderheit der Optimierung bei diesem Anwendungsfall ist, dass die maximal erzielbaren Ergebnisse bereits vorab feststehen. Diese können mit den separat betrachteten Betriebsführungen ermittelt werden, welche jeweils die höchst mögliche Eigenverbrauchssteigerungen und Spitzenleistungsreduktion für den gegebenen Residualleistungsverlauf, den Speicherparametern und der Leistungsschwelle P_T aufzeigen. Erreicht die kombinierte Betriebsführung in beiden Zielen die gleichen Werte, kann davon ausgegangen werden, dass das bestmögliche Ergebnis vorliegt.

Im Folgenden wird das Prinzip an einem beispielhaften Residualleistungsverlauf gezeigt. Bewertet wird das Ergebnis durch den Vergleich mit separaten Betriebsführungen. 8 zeigt das Ergebnis der kombinierten Zielsetzung bei idealer Prädiktion: dabei wurden sowohl 100% der möglichen Spitzenleistungsreduktion als auch 100% der möglichen Eigenverbrauchssteigerung (bezogen auf die Ergebnisse der separaten Betriebsführungen) erreicht.

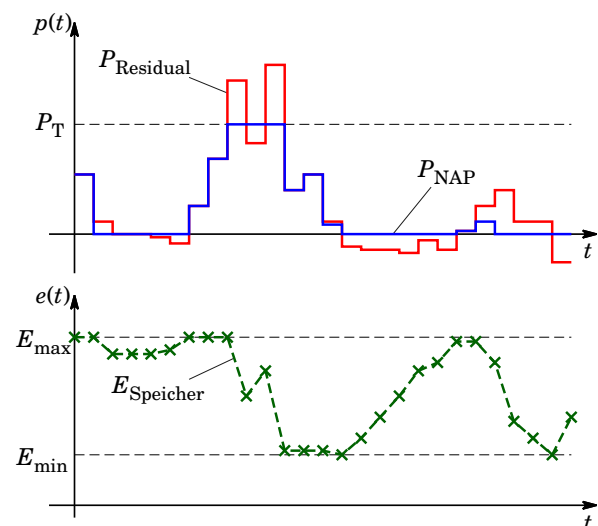


Fig. 8: Beispiel zur kombinierten Zielsetzung (mit idealer Prädiktion)

9 zeigt das Ergebnis der kombinierten Zielsetzung bei stark fehlerhafter Prädiktion, um mögliche Probleme bei der Betriebsführung aufzuzeigen. Dabei wurden lediglich 63,18% der möglichen Spitzenleistungsreduktion und 44,4% der möglichen Eigenverbrauchssteigerung erreicht.

Die problematischen Stellen sind in 9 markiert. An der Stelle (A) wurde eine zu hohe Rückspeisung prädiziert, somit kann der Speicher nicht vollständig geladen werden. Treten im Folgenden Spitzen-

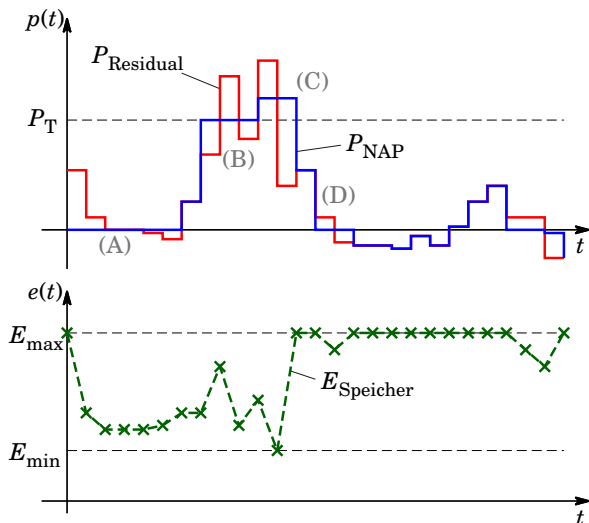


Fig. 9: Beispiel zur kombinierten Zielsetzung (mit stark fehlerhafter Prädiktion)

leistungen auf, muss der Speicher vorher aus dem Netz geladen werden.

Dies wird bei diesem Beispiel an der Stelle (B) auch prädiziert, jedoch zu spät. Daher war es nicht mehr möglich, den Speicher vor den Spitzenleistungen voll zu laden und im folgenden kann die Leistungsschwelle P_T nicht mehr gehalten werden.

An der Stelle (C) werden fälschlicherweise weiterhin Spitzenleistungen prädiziert. Dies führt dazu, dass der Speicher wieder aus dem Netz nachgeladen wird, was nicht notwendig wäre und im Folgenden die Möglichkeiten zur Eigenverbrauchssteigerung negativ beeinträchtigt.

Zuletzt wird an der Stelle (D) gezeigt, dass die Prädiktion eine zu geringe Rückspeisung prädiziert (zu gering oder aber einen Schritt zu spät). Wäre in beiden Intervallen vor der Rückspeisung der Spei-

cher entladen worden, wäre eine höhere Eigenverbrauchssteigerung möglich gewesen.

Diese Beispiele zeigen, dass eine hohe Güte der Prädiktion wichtig ist, um die Kostenreduktion zu maximieren.

Ergebnisse

Die vorgestellte Methode wurde auf reale Messwerte angewandt. Die zugrundeliegenden Messwerte stammen von einem Standort eines Industrieunternehmens, an dem unter anderem ein Blockheizkraftwerk und eine Photovoltaikanlage installiert sind. 10 zeigt einen Zwei-Wochen-Ausschnitt der Ergebnisse, in dem sowohl Speicherzyklen zur Eigenverbrauchssteigerung als auch zur Spitzenleistungsreduktion erkennbar sind. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass der Speicher für die Eigenverbrauchssteigerung nicht voll ausgenutzt wird. Dies wird daran deutlich, dass es zu Einspeisezeiträumen kommt, ohne dass der Speicher vorher vollständig entladen war, obwohl dies möglich gewesen wäre. Dies erklärt sich durch die nicht ideale Prädiktion und durch Sicherheitszuschläge, die letztlich aber auch erst durch die nicht ideale Prädiktion notwendig werden. Die Eigenverbrauchssteigerung liegt dadurch, verglichen mit einer Betriebsstrategie zur reinen Eigenverbrauchssteigerung, bei 81,54%. Die Leistungsgrenze von 2,4 MW wurde jedoch im gesamten Zeitraum eingehalten. Die Spitzenleistungsreduktion wurde also, verglichen mit einer reinen Spitzenleistungsreduktionsstrategie, zu 100% erreicht. Es ist bei diesem Beispiel noch anzumerken, dass aus Darstellungsgründen ein sehr großer Speicher gewählt wurde, dieser wäre jedoch aus wirtschaftlicher Sicht zu groß gewählt.

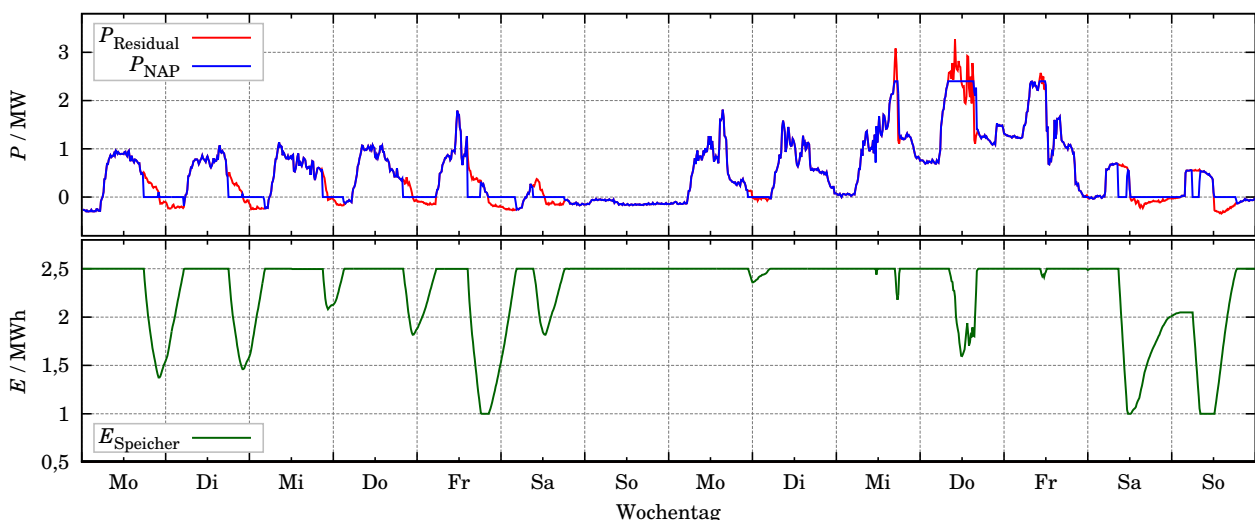


Fig. 10: Ausschnitt der Ergebnisse über zwei Wochen mit $E_{\max} = 2,5 \text{ MWh}$, $E_{\min} = 1 \text{ MWh}$ und $P_T = 2,4 \text{ MWh}$

Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, sowohl Spitzenleistungsreduktion als auch Eigenverbrauchssteigerung in der Speicherbetriebsstrategie eines industriellen Microgrids simultan zu berücksichtigen. Bei idealer Prädiktion können die beiden Ziele sogar so kombiniert werden, dass in beiderlei Hinsicht keinerlei Nachteile gegenüber separaten Betriebsstrategien in Kauf zu nehmen sind. Bei nicht idealer Prädiktion kann dies nicht vorausgesetzt werden, wobei vor allem der Grad der Eigenverbrauchssteigerung abnimmt. Das vorgestellte Fallbeispiel mit Verwendung von realen Messdaten und nicht idealer Prädiktion zeigt, dass es durchaus möglich ist, trotz erheblicher Eigenverbrauchssteigerung den gleichen Grad an Spitzenleistungsreduktion zu erreichen, wie es eine nur auf Spitzenleistungsreduktion ausgelegte Betriebsstrategie erreicht hätte. Dies erhöht die Wirtschaftlichkeit des Speichereinsatzes wesentlich.

Literaturverzeichnis

- [1] Moseley, P., Garche, J.: Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing, Elsevier Verlag, 2015, S. 43
- [2] Vogt, T., Fröhleke, N., Böcker, J., Kempen, S.: Considerations on Peak Power Clipping Thresholds in Microgrids, 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), 2014
- [3] Dittmar, R., Pfeiffer, B.-M.: Modelbasierte prädiktive Regelung, Oldenbourg Verlag, 2004